le Scienze

Dicembre 2019
euro 4,90

edizione italiana di Scientific American

POSTE ITALIANE SPED. IN A.P. - D.L. 353/2003
CONV. L. 46/2004, ART. 1, C. 1, DCB - ROMA
RIVISTA MENSILE - NUMERO 616 - 2 DICEMBRE 2019

Dossier
Lo stato della salute riproduttiva delle donne

Neuroscienze
Un esperimento solleva domande sulla fine della vita

Medicina
Combattere i tumori ispirandosi all'evoluzione

Novità

Sabine Hossenfelder
Sedotti dalla matematica
Come la bellezza ha portato i fisici fuori strada

"Bell'esempio di come la scienza sa riconoscere i propri errori"
CARLO ROVELLI

Che cosa intendiamo oggi per "razza"? Quanto siamo simili e quanto diversi?

Come sviluppiamo le capacità che ci distinguono dagli altri animali

Per fare le scelte migliori servono rappresentanti competenti

www.raffaellocortina.it Editore indipendente dal 1981

in copertina

La scoperta di superconduttori a temperatura ambiente potrebbe rivoluzionare il settore dell'energia elettrica
Science Source/Getty Images Plus (*superconduttore*)

Sommario

Dicembre 2019 numero 616

82
ETOLOGIA
Lotte fra animali
di Gareth Arnott e Robert W. Elwood
È convinzione molto diffusa che tutti gli animali sappiano valutare la capacità di un rivale nella lotta. Recenti ricerche dimostrano che non è sempre così

IL FUTURO DELLA MEDICINA

28 **Terreno fertile**
Tra rischi inaspettati e nuovi fenomeni sociali dettati dagli avanzamenti della scienza, la salute riproduttiva delle donne è ancora un diritto da difendere

FISIOLOGIA
30 **Fine di un ciclo**
di Virginia Sole-Smith
Tabù vecchi di secoli hanno frenato le ricerche sul funzionamento del ciclo femminile, con gravi conseguenze per la salute delle donne

SALUTE
38 **Riproduzione sicura?**
di Cristina Da Rold
Rischi da parto, poca contraccezione e disinformazione: in Italia la salute riproduttiva femminile ha dei problemi

INFOGRAFICA
44 **Una mortalità inaspettata**
Testi di Cristina Da Rold, grafica di Valentina D'Efilippo
In Italia i decessi da parto sono più elevati di quanto ritenuto in passato

BIOMEDICINA
48 **Ovuli al fresco**
di Valentina Murelli
Congelare ovociti giovani in attesa del momento buono per usarli è la nuova frontiera della procreazione medicalmente assistita

FISICA
56 **Un superconduttore da sogno**
di Bob Henderson
La sfuggente superconduzione, per cui un materiale conduce corrente elettrica senza resistenza, a temperatura ambiente potrebbe essere finalmente raggiunta grazie a nuovi progressi teorici e computazionali

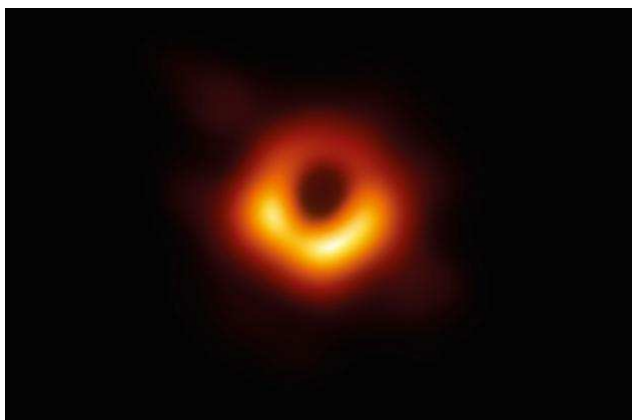
MEDICINA
64 **La ricetta di Darwin contro il cancro**
di James DeGregori e Robert Gatenby
Un nuovo approccio alle terapie oncologiche e alla prevenzione dei tumori si ispira ai principi dell'evoluzione e della selezione naturale

MATEMATICA
70 **Il problema dei tre corpi**
di Richard Montgomery
Sebbene i matematici sappiano che non potranno mai «risolvere» compiutamente questo enigma vecchio di secoli, affrontarne alcuni casi particolari ha portato a scoperte affascinanti

NEUROSCIENZE
78 **È reversibile la morte?**
di Christof Koch
Un esperimento in cui sono stati parzialmente riportati in vita cervelli di maiale solleva domande su quando, esattamente, finisce la vita

Vince Burton/Alamy

12

14

19

7 Editoriale
di Marco Cattaneo

8 In edicola

12 Intervista
La nona volta della signora dei ghiacci *di Simona Regina*

14 Made in Italy
Dal pellame nascono (anche) i fiori *di Letizia Gabaglio*

16 Il matematico impertinente
L'importanza dell'origine *di Piergiorgio Odifreddi*

17 Scienza e filosofia
Geni inaspettati *di Telmo Pievani*

18 Homo sapiens
Una nuova culla per l'umanità? *di Giorgio Manzi*

19 La finestra di Keplero
I tunnel dello spazio-tempo *di Amedeo Balbi*

88 Coordinate
Le onde dell'universo *di Katie Peek*

89 Povera scienza
Brevetti militari e fusione nucleare *di Paolo Attivissimo*

90 La ceretta di Occam
La bufala che sembra un test *di Beatrice Mautino*

91 Pentole & provette
C'è intolleranza e intolleranza *di Dario Bressanini*

92 Rudi matematici
Stereofonia con steroidi
di Rodolfo Clerico, Piero Fabbri e Francesca Ortenzio

94 Libri & tempo libero

SCIENZA NEWS

20 Meglio della CRISPR
22 Un wormhole nella Via Lattea?
22 Sovrapposizione quantistica da record
23 Una vita resiliente
23 Ecco perché le uova degli uccelli hanno colori diversi
24 Agricoltura biologica e gas serra
24 Un carburante «verde» grazie a una foglia artificiale
25 Cromosomi dallo stesso genitore
25 L'amnesia immunitaria provocata dal virus del morbillo
26 Brevissime

Pink Lady®

UNA FILIERA RESPONSABILE

Per i produttori

Pink Lady® è un'associazione che, in virtù del suo modello organizzativo, difende il diritto ad una giusta remunerazione di tutti gli attori della filiera.

Per l'ambiente e la salute

Impegnata in un percorso responsabile, Pink Lady® incoraggia le pratiche agro-sostenibili e la conservazione delle risorse naturali.

Per i consumatori

Tutti gli attori della filiera Pink Lady® sono impegnati a garantire la produzione di una mela sana di grande qualità e nell'assicurare la massima trasparenza nei confronti dei suoi consumatori.

Per la società

Interprete dello sviluppo economico e sociale dei territori di produzione, la filiera Pink Lady® è impegnata anche nella riduzione degli sprechi alimentari e nella eliminazione della plastica mono uso.

Per maggiori informazioni visitate il sito:
www.pinkladyeurope.com

Pink Lady®

Molto più di una mela

di Marco Cattaneo

Editoriale

Un imprevisto sulla fine della vita

In un singolare esperimento, cervelli di maiali morti hanno recuperato le loro funzioni a livello cellulare

Nihil morte certius, dicevano i latini, nulla è più certo della morte. Una frase che ricorre anche in Seneca e Cicerone. Molti secoli più avanti Christopher Bullock, attore commediografo britannico di fine Seicento, figlio del più celebre William, l'avrebbe associata a un altro flagello dell'era moderna, le tasse, in un'affermazione che spesso è erroneamente attribuita a Benjamin Franklin.

Certo, se guardiamo ai dati ISTAT sull'evasione fiscale in Italia di certezze continua a rimanerne una sola. E in verità vacilla anche quella, si direbbe, a leggere l'articolo di Christof Koch a pagina 78. Ma andiamo per gradi.

Perché la certezza della morte ha anche lei attraversato le sue peripezie. Per quasi tutta la storia dell'umanità, infatti, si è identificato il momento della morte con la cessazione di alcune, precise, funzioni fisiologiche. Per dirla con Koch, «quando una persona non respirava più e il battito del suo cuore cessava per qualche minuto, era morta». Poi è arrivata la terapia intensiva. E la sede della morte è transitata dal cuore al cervello. Eppure anche in questa versione il nostro ultimo orizzonte rimane piuttosto sfuocato. I corpi cerebralmente morti, d'altra parte, continuano a manifestare funzioni vitali.

Sulla morte cerebrale, per di più, sui tempi in cui avviene, su quando si possa davvero definire tale, si è appena aperto uno squarcio di dubbio, e in particolare sul concetto di coma irreversibile introdotto mezzo secolo fa da un'apposita commissione della Harvard Medical School. Anche perché, sottolinea Koch, ciò che era irreversibile all'inizio del Novecento non lo è più con le tecnologie di oggi.

E cita un articolo, pubblicato su «Nature» a metà aprile, in cui un gruppo di ricerca della Yale School of Medicine ha illustrato i risultati di un singolare esperimento condotto su cervelli di maiale. Collegando vene e carotidi a un dispositivo di perfusione, hanno osservato che – quattro ore dopo la presunta morte cerebrale – i cervelli recuperati con una speciale soluzione circolante riprendevano le loro funzioni, almeno a livello cellulare: in altre parole, i neuroni della corteccia cerebrale conservavano la capacità di produrre attività elettrica e sinaptica.

Per quanto inquietante, la domanda che salta immediatamente alla mente è quasi scontata: si potrebbe applicare una procedura del genere al cervello umano? In linea teorica, sì. Anche se va detto che il gruppo di Yale ha aggiunto alla sua soluzione un cocktail di farmaci in modo da sopprimere le funzioni neurali e inibire la comunicazione tra i neuroni. Perciò non sappiamo se quei cervelli «risvegliati» avessero subito danni o meno. Ma non c'è dubbio che, una volta aperta la strada, a qualcuno potrebbe venire in mente di provarci. E non sarebbe una buona idea, prima di aver capito se un cervello rivitalizzato sia un cervello sano.

Resta tuttavia il fatto che la possibilità, sia pure ancora remota e decisamente ipotetica, di restituire piena funzionalità a un cervello morto, secondo l'attuale definizione, rende ancora più annebbiata la nostra idea della morte, spostando in direzioni forse impreviste il dibattito sul fine vita. Sarà opportuno tenerne conto, nei dibattiti di bioetica, in prospettiva futura, prima di farsi trovare impreparati di fronte a episodi della vita reale.

A richiesta a gennaio, *Una bellissima domanda*, un libro del premio Nobel Frank Wilczek sul rapporto tra scienza e ricerca del bello

La bellezza del mondo

Quando si discute di teorie scientifiche, la verità è molto desiderabile, ma non è l'unico criterio e nemmeno il più importante. Ne è convinto Frank Wilczek, uno dei massimi fisici teorici del nostro tempo, premio Nobel nel 2004 per i suoi contributi alla comprensione della cosiddetta interazione forte, ovvero la forza della natura che rende possibile l'esistenza dei nuclei degli atomi. Secondo Wilczek, un altro criterio, non di rado sottovalutato nella storiografia della scienza, è quello della ricerca del bello, come illustra nel suo libro *Una bellissima domanda*, allegato a richiesta con «Le Scienze» di gennaio.

Il filo rosso che lega i vari capitoli è il tentativo di rispondere al quesito: il mondo incarna idee bellissime? (La domanda accennata nel titolo). E questo intento è perseguito con gli occhi dello scienziato, in un viaggio che inizia nell'antica Grecia. Già Pitagora e Platone, il secondo in particolare, avevano fatto della ricerca del bello e della simmetria un metodo di indagine sul mondo naturale, che sarebbe ricomparso in modo mirabile tra il XVII e il XVIII secolo. In quel periodo, Isaac Newton avrebbe elaborato una descrizione scientifica dell'universo poggiata anche sulla ricerca di una componente estetica; e lo stesso avrebbero fatto nei secoli successivi giganti come James Clerk Maxwell, Albert Einstein, Paul Dirac, e tutti quegli scienziati che hanno contribuito anche in tempi recenti a strutturare la nostra comprensione di base della realtà che, secondo Wilczek, trova la sua massima espressione nella teoria che descrive le particelle elementari che compongono la materia e lo loro interazioni.

Sì, il mondo può essere un'opera d'arte, parola di Nobel.

QUADERNI

Tutta la scienza in formato digitale

Una collana esclusivamente digitale, composta di numeri monografici che raccolgono alcuni dei migliori articoli, italiani e internazionali, pubblicati nell'edizione cartacea e in quella on line della rivista su un tema di attualità scientifica. *I quaderni de Le Scienze* possono essere acquistati sul nostro sito web a 2,99 euro in offerta promozionale di lancio. Dopo le uscite su materia oscura, impatto del riscaldamento globale su Artide e Antartide, e Neanderthal, è disponibile un nuovo numero, in formato PDF interattivo, scaricabile e stampabile: *Intelligenza artificiale*, luci e ombre degli straordinari progressi di una tecnologia sempre più potente e pervasiva. E da metà dicembre, appuntamento con nuovi argomenti.

FUMETTI

Manga per diventare scienziati

Se siete appassionati di fumetti e di scienza, in edicola potrete trovare *I manga delle scienze*, un'iniziativa di «Le Scienze» e «la Repubblica», in vendita a 9,90 euro in più oltre al prezzo della rivista o del giornale. La collana dei manga di scienza ha cadenza settimanale, dal 4 ottobre al 20 dicembre. È disponibile anche in formato digitale, che potete acquistare sul nostro sito web: www.lescienze.it .

PIANO DELL'OPERA

4 ottobre
Fisica
11 ottobre
Analisi matematica
18 ottobre
Relatività
25 ottobre
Biologia: DNA e genetica
1 novembre
Statistica
8 novembre
Astronomia
15 novembre
Database
22 novembre
Elettromagnetismo
29 novembre
Biochimica
6 dicembre
Matematica
13 dicembre
Regressione
20 dicembre
Anatomia

iStock; elaborazione Le Scienze

L'oceanografa Paola Rivaro farà parte della trentacinquesima spedizione scientifica italiana in Antartide, dove è già stata otto volte

La nona volta della signora dei ghiacci

Come Sherlock Holmes, anche Paola Rivaro va a caccia di indizi, di tracce da raccogliere e analizzare per fare chiarezza sui cambiamenti climatici. La sua «scena del crimine» è il Mare di Ross perché è lì che l'oceanografa dell'Università di Genova raccoglie i campioni di acqua e di ghiaccio che poi finiscono in custodia nelle grandi celle frigorifere del Dipartimento di chimica dell'ateneo ligure. Lì si trova la banca di campioni ambientali antartici. E lì finiranno anche i campioni che verranno raccolti nel corso della nuova campagna oceanografica che Rivaro coordina in occasione della trentacinquesima spedizione scientifica italiana in Antartide. «Lavoreremo a bordo della nave rompighiaccio *Laura Bassi*, alla sua prima impresa targata Programma nazionale di ricerche in Antartide (PNRA)» racconta la ricercatrice, che nel continente bianco c'è andata già otto volte, guadagnandosi l'appellativo della «signora dei ghiacci».

Quando c'è stata la sua prima spedizione in Antartide?

La prima volta risale a 25 anni fa. Era il 1994: all'epoca ero una studentessa di dottorato e l'Antartide era, rispetto a oggi, un luogo ancora più isolato. Comunicare con il resto del mondo era qualcosa di epico: chiamavo casa con il ponte radio dalla stanza del marconista, la voce andava e veniva... Oggi invece la tecnologia ci fa sentire meno lontani: comunichiamo con *WhatsApp*, possiamo organizzare videoconferenze con le scuole.

Emozionata per la nuova spedizione?

Ogni spedizione è una nuova avventura: una sfida umana e scientifica che regala nuove emozioni. Ci si trova nel posto più remoto del pianeta, in mezzo all'oceano, circondati dal nulla. A volte si ha la sensazione di essere sospesi. La nave è già in viaggio mentre la campagna scientifica inizierà a gennaio. A inizio anno quindi io e i colleghi saliremo a bordo della *Laura Bassi* che per circa 40 giorni sarà la nostra casa e il nostro laboratorio.

La campagna oceanografica si svolgerà nel Mare di Ross: perché studiare proprio questa regione dell'Oceano Meridionale?

Il Mare di Ross è uno dei due mari più accessibili, insieme al Mare di Weddel, del continente antartico e lì si affaccia la base «Mario Zucchelli», uno dei due avamposti italiani in Antartide: quindi è strategico da un punto di vista logistico. Ma è oggetto della nostra attenzione soprattutto perché è una zona doc, un po' come i vigneti.

Vale a dire?

In poche zone dell'Antartide si formano le *Antarctic bottom waters*: sono le acque più dense del pianeta, che si posizionano quindi sul fondo di tutti gli oceani. Proprio al margine del Mare di Ross si attivano i più rilevanti processi di formazione e diffusione di queste acque oceaniche profonde: sono acque super fredde e contribuiscono quindi al bilancio termico terrestre.

In altre parole, le acque superficiali di questo mare sprofondano ed entrano in circolazione nei bacini oceanici trasportando il freddo. Esse giocano quindi un ruolo determinante nella circolazione globale oceanica con conseguenze sulla regolazione del clima del nostro pianeta. Perché il clima terrestre è il risultato dell'interazione tra oceano, atmosfera, criosfera, zone polari e terre emerse.

di Simona Regina

CHI È

PAOLA FRANCESCA RIVARO

Professoressa al Dipartimento di chimica e chimica industriale dell'Università di Genova, insegna oceanografia chimica e chimica dell'ambiente. Laureata in scienze biologiche e dottore di ricerca in scienza del mare, dal 1994 è coinvolta nel PNRA. Ha già preso parte a otto spedizioni al Polo Sud, partecipando o coordinando diversi progetti di ricerca. I suoi interessi riguardano la biogeochimica marina: in particolare i processi di ventilazione e di acidificazione nel Mare di Ross in relazione al cambiamento climatico.
Nel 2003 le è stato assegnato da PNRA e Accademia nazionale dei Lincei il premio di ricerca Felice Ippolito per il settore scienze del mare.

L'istituto nazionale di oceanografia e di geofisica sperimentale ha acquistato la nave *Ernest Shackleton*, ribattezzandola *Laura Bassi*.

Le studierà anche in questa nuova missione?

Nel corso della campagna oceanografica, coordinerò le attività di quattro progetti di ricerca che coinvolgono CNR, ENEA, ISPRA, OGS, Università Ca' Foscari Venezia, Università «Parthenope» di Napoli e Università di Genova. Uno è finalizzato proprio a indagare le acque profonde che si formano in Antartide per capire se le loro proprietà chimiche stanno cambiando e come a causa del cambiamento climatico.

Per esempio, per lungo tempo i dati registrati nel settore Pacifico dell'Oceano Meridionale hanno indicato un andamento in diminuzione della salinità delle acque di piattaforma, con conseguenze sulle caratteristiche delle acque profonde. Questo andamento è addebitato alla fusione dei ghiacciai continentali. Negli ultimi 5-7 anni si è osservato invece un rallentamento di questo processo e un rimbalzo verso valori più alti di salinità. Ma non solo; queste acque, nascendo in superficie, catturano il freddo ma anche i gas dall'atmosfera che poi sono veicolati in profondità: ossigeno, CO_2 e altri gas a potenziale effetto serra. Da un lato questo sistema di sprofondamento delle acque è un sistema naturale che il nostro pianeta mette in funzione per immagazzinare CO_2: quando entra nella circolazione profonda vi rimane per secoli. Dall'altro la CO_2 trasportata in profondità modifica la chimica delle acque: in particolare altera il pH facendo aumentare l'acidità. Se arriva a dosi elevate, aumenta l'acidificazione con grossi effetti sull'ecosistema: pensate per esempio all'impatto sugli organismi che hanno scheletri o gusci calcarei.

Di che cosa si occuperanno gli altri progetti?

Studieremo la contaminazione ambientale. Perché nonostante l'Antartide sia il luogo più remoto del pianeta non è un'oasi incontaminata: inquinanti organici e metalli sono trasportati fin lì. Ne misureremo la distribuzione nell'aerosol e nell'acqua marina.

Inoltre, gestiremo la rete degli osservatori marini posizionati fin dal 1994 nel Mare di Ross: sono strumenti importanti per lo studio dei cambiamenti climatici e della variabilità dei processi fisici e biogeochimici nella colonna d'acqua, perché dotati di sensori che registrano temperatura, direzione delle correnti e altri parametri. Sono i nostri occhi che ci permettono di monitorare la situazione anche durante la nostra assenza nelle gelide acque del Mare di Ross e studiarne l'evoluzione nel tempo. Infine studieremo le placche del fondo marino. L'Oceano Pacifico sud-occidentale oltre il sessantesimo meridiano è una delle aree meno investigate del pianeta a causa della sua difficile accessibilità eppure è molto importante da un punto di vista geologico. È un punto di osservazione fondamentale per la comprensione della dinamica di deformazione di tre grandi placche: la Pacifica, l'Antartica e l'Australiana.

Comunicare l'emergenza clima è una sfida per voi scienziati?

Lo facciamo e dobbiamo farlo, ma evidentemente non siamo stati abbastanza capaci di spiegare che siamo già nel pieno di una crisi climatica e che i cambiamenti li stiamo già vivendo. Per cui non possiamo rimandare a domani scelte strategiche per mitigarne gli effetti.

SICIT offre un servizio strategico per il settore conciario, ritirando e trasformando residui in biostimolanti per il settore dell'agricoltura

Dal pellame nascono (anche) i fiori

I conciatori sono riciclatori *ante litteram*. Borse, scarpe e cinture di pelle derivano dalla lavorazione dello scarto dei macelli. Se le pelli non venissero conciate andrebbero a finire in discarica. Ma il processo di conciatura a sua volta produce scarti che, ancora, possono essere riutilizzati. Per farne che cosa? Idrolizzati proteici. Catene più o meno lunghe di amminoacidi derivanti dall'idrolisi del collagene, la principale sostanza di cui sono composti gli scarti da riciclare. Sostanze preziose, per esempio, per aiutare le piante a crescere meglio.

Integratori per vegetali

È quello che, fra le altre cose, fa SICIT Group, azienda nata nel 1960 che, almeno dieci anni prima che il termine fosse coniato, decide di entrare nella *circular economy* e di investire nella trasformazione e nel riciclo. Siamo in provincia di Vicenza: qui l'economia locale si basa sulla concia e sono gli stessi imprenditori a ingegnarsi per capire cosa fare degli scarti che producono. «La situazione al tempo qui era davvero diversa, l'impatto ambientale delle concerie era molto alto: sia per l'odore, adesso praticamente scomparso, sia per i resti del pellame. Basti pensare che in media da 100 chilogrammi di pelle grezza solo 25 si trasformano in prodotto, la pelle finita, il resto è rifiuto», spiega Massimo Neresini, amministratore delegato di SICIT Group.

Insomma, il distretto industriale che stava nascendo non poteva certo soffocare a causa dei suoi stessi scarti e così si è pensato una serie di iniziative. SICIT, controllata in parte da una *holding* in mano ad aziende conciarie, è sicuramente l'esempio di maggior successo. L'idea di impiegare gli scarti della lavorazione della pelle per nutrire le piante viene dalla semplice osservazione di quello che accade in natura: il terreno si nutre di azoto, carbonio e sali contenuti nelle carcasse degli animali; le piante crescono e poi sono mangiate dagli animali. E il ciclo si chiude. Se è vero che l'essere umano si introduce in questo scambio sottraendo materiale – gli animali sono allevati per produrre latte e carne – ne può sicuramente restituire una parte che non è usata: la pelle.

Per farlo c'è bisogno della tecnologia: «Pensiamo al collagene come a una catenina e agli amminoacidi, come agli anellini che la compongono. Con l'idrolisi riusciamo a spezzare la catenina in diversi punti e possiamo creare amminoacidi liberi, un solo anellino o peptidi a catena corta, quando il pezzetto è formato da qualche anellino congiunto», spiega Neresini. «All'inizio il processo era semplice e anche i prodotti non erano molto raffinati. Nel corso degli anni, però, grazie agli investimenti in ricerca e sviluppo abbiamo messo a punto processi di raffinazione complessi che ci hanno permesso di realizzare idrolizzati proteici pensati *ad hoc* per le diverse coltivazioni». Sono i biostimolanti, sostanze che migliorano l'assorbimento dei nutrienti contenuti nei fertilizzanti, riducono anche in maniera sostanziale l'uso di agro-farmaci, aumentano la produzione e la qualità del raccolto, aiutano la pianta a superare le sempre più frequenti condizioni di stress abiotici, come siccità, grandi piogge, gelo.

«I biostimolanti sono come gli integratori per gli essere umani: non sono farmaci, ma sostanze che fortificano l'organismo e quindi aiutano a prevenire le malattie e ad affrontare meglio le situa-

sborisov/iStock (*spighe*); cortesia SICIT (*stabilimento*)

di Letizia Gabaglio

In basso a sinistra, una vista dall'alto degli stabilimenti di SICIT; a fianco, un particolare dell'interno. L'azienda trasforma gli scarti delle concerie vicentine in prodotti utili alla crescita delle piante di interesse agricolo.

LA SCHEDA - SICIT

Azienda fondata nel 1960
Persone di riferimento: Massimo Neresini (amministratore delegato); Valter Peretti (presidente)
Sito: http://www.sicitgroup.com **Mail:** info@sicitgroup.com
Numero di brevetti: SICIT ha sviluppato molti brevetti che derivano sia dallo studio chimico che da processi innovativi.
Dipendenti-collaboratori: 127

Cortesia SICIT

zioni di stress», spiega l'amministratore delegato. Prodotti abbastanza sofisticati che SICIT mette a punto e vende in oltre 90 paesi del mondo grazie ai suoi due stabilimenti fortemente automatizzati e ai tre laboratori all'avanguardia: chimico, dove si migliorano i processi; agronomico, dove si saggia l'efficacia delle sostanze; controllo di qualità, dove ci si assicura che il prodotto sia conforme agli standard. I biostimolanti che escono dai due stabilimenti di Arzignano sono di due tipi: quelli più semplici che contengono solo amminoacidi e peptidi; quelli «speciali» a base di meso e microelementi complessati con amminoacidi e peptidi, specifici per prevenire e attivare i meccanismi di resistenza interni delle piante.

I biostimolanti hanno caratteristiche uniche nel combattere gli stress abiotici, aumentare la produzione e migliorare la qualità delle coltivazioni. Ma la ricerca va avanti, e SICIT è pronta a introdurre nel settore dell'agricoltura l'ennesima innovazione: il rilascio intelligente. «L'idea è dare al terreno e alla pianta quello di cui hanno bisogno quando ne hanno bisogno: una spinta nel momento della semina, nutrimento quando comincia a germogliare, protezione durante la fioritura e così via. In ogni fase c'è una necessità diversa a cui il nuovo prodotto che stiamo studiando e verificando in laboratorio saprà rispondere, rappresentando una vera e propria innovazione per il sistema agricoltura», sottolinea Neresini.

Un aiuto per il gesso

Nasce dalla ricerca fatta in casa anche l'altro grande filone di sviluppo dell'azienda vicentina: i ritardanti. «La scoperta è opera di un nostro chimico, oggi in pensione: usare il collagene degli scarti del pellame per sviluppare una sostanza che, aggiunta al gesso, permetta di lavorarlo meglio rallentandone la presa», spiega Neresini. L'intuizione nasce oltre 25 anni fa dal fatto che gli additivi usati fino a quel momento erano cheratine, molto simili al collagene, ma meno efficaci. Il prodotto di SICIT, naturale e biodegradabile, impiegato nella produzione di intonaco e cartongesso, è oggi il più usato nell'industria del gesso a livello mondiale.

D'altronde l'azienda vicentina da sempre si preoccupa di essere sostenibile e si vanta di essere una pioniera dell'economia circolare. «Quando parliamo di riciclo e di impatto ambientale dobbiamo guardare anche al consumo di energia, facendo un bilancio generale fra quello che consumiamo per realizzare i nostri prodotti e quello che produciamo», conclude Neresini. «In SICIT stiamo molto attenti a questo elemento e verifichiamo sempre che il bilancio sia positivo perché se per il riciclo dovessi consumare di più di quello che consumerei per disfarmi del rifiuto, allora il processo non sarebbe virtuoso».

di Piergiorgio Odifreddi

professore ordinario di logica matematica all'Università di Torino
e *visiting professor* alla Cornell University di Ithaca (New York)

L'importanza dell'origine

Il cambiamento climatico in atto è solo l'ultimo di una serie e mette a rischio noi e altre specie, non certo la Terra

La scienza si concentra sull'oggettività dei dati, invece che sulla soggettività delle impressioni, ma l'oggettività è comunque relativa, perché i dati si esprimono in un sistema di riferimento. Per esempio, le coordinate cartesiane di un punto nel piano o nello spazio sono relative alla posizione dell'origine e all'orientamento degli assi, e non significano nulla in assoluto.

Una delle migliori illustrazioni di quest'ovvia constatazione sono i dibattiti sui cambiamenti climatici, ai quali abbiamo già dedicato la rubrica di giugno. Quando si parla infatti di un aumento della temperatura media del pianeta, si dimentica quasi sempre di specificare quale sia il punto di riferimento.

Gli altri riscaldamenti

L'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), vincitore del premio Nobel per la pace nel 2007, indica nei suoi rapporti la «seconda metà dell'Ottocento». Il motivo è che solo a partire dal 1850 circa esistono dati attendibili per l'intero pianeta sulle temperature sia terrestri sia marittime. Si possono così osservare nel dettaglio le fluttuazioni alla breve o alla lunga delle medie planetarie, e rappresentarle con curve che diventano via via più lisce localmente, e mostrano un chiaro andamento globale crescente. Secondo l'IPCC, l'aumento complessivo della temperatura è stato di circa 0,85 °C nell'intero periodo 1880–2012, e di 0,78 °C tra le due medie dei periodi 1850–1900 e 2003–2012: dunque, meno di 1 °C in un secolo e mezzo.

Il trattato di Parigi del 2016 parla invece ambiguamente di «livelli preindustriali» della temperatura terrestre, lasciando supporre che la temperatura media sia rimasta più o meno costante fino al 1850 circa, e che le sue uniche variazioni siano state prodotte in seguito dall'industrializzazione: di qui la confusione degli slogan ambientalisti, che chiedono ingenuamente di «salvare il pianeta». In realtà, durante i suoi quattro miliardi e mezzo di anni di storia la temperatura della Terra è cambiata selvaggiamente, come si può dedurre dagli anelli dei tronchi e dei coralli, dai carotaggi dei ghiacci, dalle perforazioni geologiche, dai sedimenti oceanici e così via.

Per esempio, nell'ultimo millennio ci sono stati due periodi climatici opposti. Da un lato, un surriscaldamento tra il 900 e il 1200 circa, con temperature paragonabili al cosiddetto «Periodo caldo romano», compreso tra il 250 prima e il 400 dopo la nostra era: quello, cioè, che permise ad Annibale di attraversare le Alpi con gli elefanti. Dall'altro lato, una «piccola era glaciale» tra il 1400 e il 1850 circa, quando i ghiacciai raggiunsero la loro massima estensione: il riscaldamento dell'era industriale è dunque relativo a un periodo precedente molto freddo.

Allargando ancora lo sguardo all'indietro, negli scorsi 500.000 anni le ere glaciali si sono susseguite a intervalli di circa 100.000 anni, e nel mezzo le temperature erano molto superiori a quelle odierne. Oltre i tre milioni di anni fa esse si sono sempre mantenute ben sopra la media dell'ultimo millennio, raggiungendo il «Massimo termico del Paleocene-Eocene» (un aumento di 6 °C) circa 55 milioni di anni fa. All'epoca l'intera Antartide era senza ghiacci, e tale rimase fino a 35 milioni di anni fa.

La fine di chi?

Questi cambiamenti climatici furono causati da eventi naturali, mentre quelli odierni sono in buona parte antropici. Tuttavia, la storia mostra che essi non mettono affatto in dubbio la sopravvivenza del pianeta: semplicemente, perturbano le condizioni atmosferiche, rendendole più adatte ad alcune specie e meno ad altre.

Se la nostra è così stupida da suicidarsi, forse merita appunto di scomparire, ma la Terra rimarrà indifferente, e farà semplicemente posto a qualcun altro più adatto.

di Telmo Pievani

professore ordinario di filosofia delle scienze biologiche
dell'Università degli Studi di Padova

Geni inaspettati

La natura sa essere più creativa di quanto immaginiamo, come dimostra la nascita di alcuni geni importantissimi

Come può nascere nel corso dell'evoluzione qualcosa di totalmente nuovo? La domanda è assai diffusa tra i frequentatori di *fake news* sul Web, convinti erroneamente che questa sia una fallacia fatale della spiegazione evoluzionistica. Di solito si risponde che la selezione naturale non crea dal nulla, ma trasforma l'esistente, riutilizza il materiale a disposizione, ingaggia strutture precedenti per svolgere nuove funzioni, come in una sorta di ininterrotto bricolage. Anche per questo alla parola «evoluzione» lo stesso Charles Darwin preferiva «trasmutazione».

Da qualche anno gli evoluzionisti hanno gli strumenti per individuare i sottili cambiamenti molecolari che stanno alla base di un nuovo adattamento, cioè le mutazioni di successo che a un certo punto della storia evolutiva di una specie diedero avvio a un cambiamento utile per la sopravvivenza e la riproduzione. Quindi, all'emergenza di una novità evolutiva. In letteratura scientifica se ne contano ormai tantissime. Ma si tratta pur sempre di modificazioni genetiche di materiale già disponibile e già funzionale. In particolare, si è pensato finora che un nuovo gene nascesse solo dalla duplicazione e poi dalla mutazione di un vecchio gene, o anche dalla fusione o dalla scissione di geni preesistenti.

Dal materiale grezzo

Ebbene, questa legge conservativa forse non è così universale. Come riportato su «Nature» in ottobre, ancora una volta impariamo che la natura sa essere più creativa della nostra immaginazione. Sono stati scoperti infatti alcuni geni importantissimi per la sopravvivenza (l'ultimo è il gene che codifica per la proteina anticongelamento nei merluzzi atlantici) che non si sono evoluti a partire da altri geni, bensì sono nati dalla combinazione di sequenze genetiche non funzionali contenute in quella preponderante e sterile porzione dei genomi che un tempo era chiamata «DNA spazzatura», ma che ora in molti sospettano abbia anche un ruolo di serbatoio di materiale grezzo per l'evoluzione.

Forse addirittura un decimo del totale dei geni di piante e animali è stato coniato così, da porzioni non codificanti di DNA e in modo più rapido del previsto. All'inizio i prodotti di questi geni incipienti erano probabilmente disordinati e inutili, ma poi le pressioni selettive potrebbero averli raffinarli fino a renderli capaci di codificare proteine funzionali. Questi geni *de novo* hanno il vantaggio di generare molecole nuove e si pensa abbiano avuto un ruolo fondamentale persino nell'evoluzione del cervello umano. Molti di essi emergono negli animali sotto la spinta potente della selezione sessuale. Altri, se alterati, sono coinvolti nella comparsa e nella progressione di alcune forme tumorali.

Qualcosa dal nulla

Grandi biologi molecolari come Sydney Brenner si erano già chiesti come mai il DNA fosse così ridondante e barocco. Adesso forse abbiamo una parte della risposta: alcune delle numerosissime sequenze in esubero sono riusate come mattoncini di riserva per nuovi geni, rendendo più dinamici e reattivi i genomi. Il problema tecnico è che non è facile distinguere i geni *de novo* da tutti gli altri. Alcuni geni molto antichi potrebbero semplicemente essere diventati talmente divergenti dal loro antenato da sembrare nuovi.

Gli autori della scoperta di questi enigmatici geni sostengono di aver dimostrato che l'evoluzione per selezione naturale può creare velocemente qualcosa dal nulla. Tuttavia, la questione resta filosoficamente aperta. In fondo, viene da pensare che si tratti ancora di bricolage sull'esistente, solo che più spericolato perché fatto anche su porzioni non codificanti del genoma, un armeggiare con il DNA che denota comunque la sottovalutata plasticità dell'evoluzione.

Merluzzo *de novo*. Il gene che codifica per la proteina anticongelamento nei merluzzi atlantici non si è evoluto a partire da altri geni, ma dalla combinazione di sequenze genetiche non funzionali.

Arco/R. Priemer/AGF

di Giorgio Manzi

ordinario di paleoantropologia alla Sapienza Università di Roma;
socio corrispondente dell'Accademia Nazionale dei Lincei

Una nuova culla per l'umanità?

Secondo uno studio, la nostra specie sarebbe emersa in una regione dell'Africa meridionale

Come spesso capita, un articolo scientifico pubblicato su «Nature» o «Science» (o altra rivista scientifica di primo piano) può destare un notevole interesse mediatico, ma non garantisce un consenso unanime. È la scienza, bellezza (direbbe qualcuno)! Una cosa sono i dati, che dovrebbero essere riproducibili e pertanto abbastanza robusti, altra cosa sono le interpretazioni.

È quello che è capitato a un articolo di Vanessa Hayes e colleghi, pubblicato su «Nature» con il titolo *Human origins in a southern African palaeo-wetland and first migrations*, in cui si conclude che i primi rappresentanti di *Homo sapiens* siano comparsi in Africa meridionale (*sic*) 200.000 anni fa e da lì, a seguito di significativi cambiamenti climatici, si siano diffusi in altre aree del continente africano.

Una variante ancestrale

Nello studio sono stati raccolti campioni di sangue, grazie al contributo delle comunità Khoisan (o Khoe-San) in Namibia e Sudafrica: pastori e cacciatori-raccoglitori noti anche come Ottentotti e Boscimani. Si tratta di campioni di grande interesse visto che le popolazioni a cui fanno riferimento sono ritenute le più prossime alle caratteristiche originarie della nostra specie. Questa importante base di partenza ha permesso di stilare un catalogo di varianti rare del genoma mitocondriale, con riferimento al cosiddetto *L0 lineage*. Il genoma mitocondriale è un particolare tipo di DNA che si trasmette solo per linee materne e che, dunque, si presta bene per ricostruzioni filogenetiche, non essendo soggetto (come invece il genoma nucleare) a ricombinazione.

I cambiamenti intercorsi nel tempo a carico di questo DNA sono stati poi armonizzati con quanto è noto sulle distribuzioni linguistiche, culturali, geografiche e storiche delle diverse comunità Khoisan. Ne è emerso che i primi portatori di varianti ancestrali del *L0 lineage* sarebbero comparsi intorno a 200.000 anni fa in una regione a sud del bacino del fiume Zambesi, che oggi include (da ovest a est) le aree più settentrionali di Namibia, Botswana e Zimbabwe.

Si aggiunge a questo un elemento paleogeografico piuttosto spettacolare: il lago Makgadikgadi, che è stato il più esteso sistema lacustre noto in Africa negli ultimi milioni di anni. Proprio sulle sue rive, secondo gli autori della nuova ricerca, sarebbe comparsa la nostra specie e da quelle parti si sarebbero stabilite le prime popolazioni di *H. sapiens* per un periodo molto lungo (circa 70.000 anni), essendo un ambiente ecologico favorevole e stabile. Lo deducono da una significativa divergenza genetica, che indicherebbe prime emigrazioni da quella sorta di Eden intorno a 120.000 anni fa, con diffusioni prima verso nord-est (Tanzania, Kenya, Etiopia) e poi anche verso sud-ovest (Sudafrica); fermo restando che alcuni gruppi rimasero stanziali, dove li troviamo ancora oggi.

Fossili che non tornano

Pochi concordano con l'interpretazione degli autori. Personalmente, non saprei dire se questa combinazione di dati genetici, bio-culturali e paleoambientali possa indicare davvero l'area di origine della nostra specie.

Anzi, mi sembra che la presenza di fossili di morfologia moderna ben prima di 120.000 anni fa nel Corno d'Africa sia in contrasto con queste conclusioni. Mi conforta però il ritorno a una prospettiva di origine «puntuata» (nel senso di Stephen Jay Gould) della nostra specie, come risulta ancora una volta dal DNA mitocondriale, campionato peraltro in popolazioni che sono cruciali per le origini di *H. sapiens*. Questo rimane a mio avviso un punto essenziale, coerente con quello che ci rende pienamente «umani», cioè la forma globulare del cranio, che per la prima volta si ritrova in reperti fossili in Etiopia, di poco successivi a 200.000 anni fa.

di Amedeo Balbi

professore associato di astronomia e astrofisica
al Dipartimento di fisica dell'Università di Roma Tor Vergata

I tunnel dello spazio-tempo

Come riconoscere i wormhole, strutture ipotetiche che collegano punti del cosmo molto lontani tra di loro

Ormai nessun astrofisico nutre dubbi sul fatto che il centro della nostra galassia (e, per la verità, della maggior parte delle galassie nell'universo) ospiti un buco nero supermassiccio. L'immagine di uno di questi oggetti nel nucleo della galassia M87, catturata recentemente dall'Event Horizon Telescope, ha reso l'evidenza ancora più tangibile anche per i non addetti ai lavori, sovrapponendola a quella che il cinema di fantascienza aveva messo in scena solo pochi anni fa, con il film *Interstellar*. Proprio inseguendo le suggestioni della fantascienza, ci si potrebbe porre una domanda: sarebbe possibile capire se il buco nero al centro della galassia è, in realtà, un *wormhole*?

Viaggi interstellari

Per chi fosse a digiuno di scenari speculativi di questo tipo, vale la pena ricordare che un wormhole (o, più precisamente, un ponte di Einstein-Rosen) è una struttura ipotetica che connette due regioni di spazio-tempo. Una scorciatoia, se vogliamo, per viaggiare quasi istantaneamente tra punti dell'universo molto lontani tra loro: ed è proprio questo a rendere i wormhole così allettanti per gli autori di fantascienza.

Non a caso, l'interesse attorno a questi oggetti, la cui esistenza era stata teorizzata già nei primi decenni del XX secolo, fu riaccesa negli anni ottanta da un lavoro di Kip Thorne (premio Nobel per la fisica lo scorso anno) e Michael Morris, dal titolo *Wormholes in spacetime and their use for interstellar travel: A tool for teaching general relativity*, pubblicato sull'«American Journal of Physics».

Lo studio di Morris e Thorne era stato stimolato da una richiesta di Carl Sagan che, per la scrittura del suo romanzo *Contact*, aveva bisogno di un modo rapido per portare la protagonista in un altro sistema stellare. Thorne, in seguito, usò il proprio studio come spunto per il soggetto di *Interstellar*.

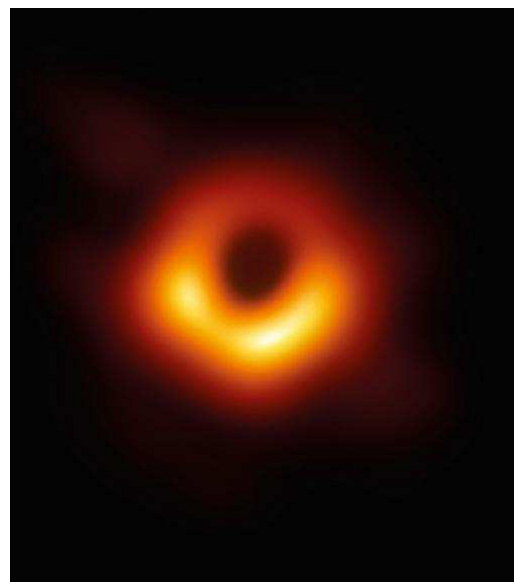
Ma torniamo dalla fantascienza alla scienza: che possibilità ci sono che i wormhole esistano davvero e che possano essere osservati?

Riguardo alla prima questione, lo stesso Thorne era molto scettico. La presenza di un tunnel stabile e attraversabile nello spazio-tempo, pur consentita dalla teoria generale della relatività di Einstein, richiederebbe condizioni energetiche particolari che sembrano poco plausibili allo stato delle nostre conoscenze. Tuttavia, ci si potrebbe chiedere se, ammesso che un wormhole esista, saremmo in grado di riconoscerlo, dal momento che la sua imboccatura sarebbe estremamente simile a un buco nero. Nel 1995, uno studio dal titolo *Natural Wormholes as Gravitational Lenses*, pubblicato su «Physical Review D», suggerì di usare a questo scopo l'effetto di lente gravitazionale generato dal wormhole, che darebbe un segnale diverso da quello di un «normale» buco nero.

Influenza reciproca

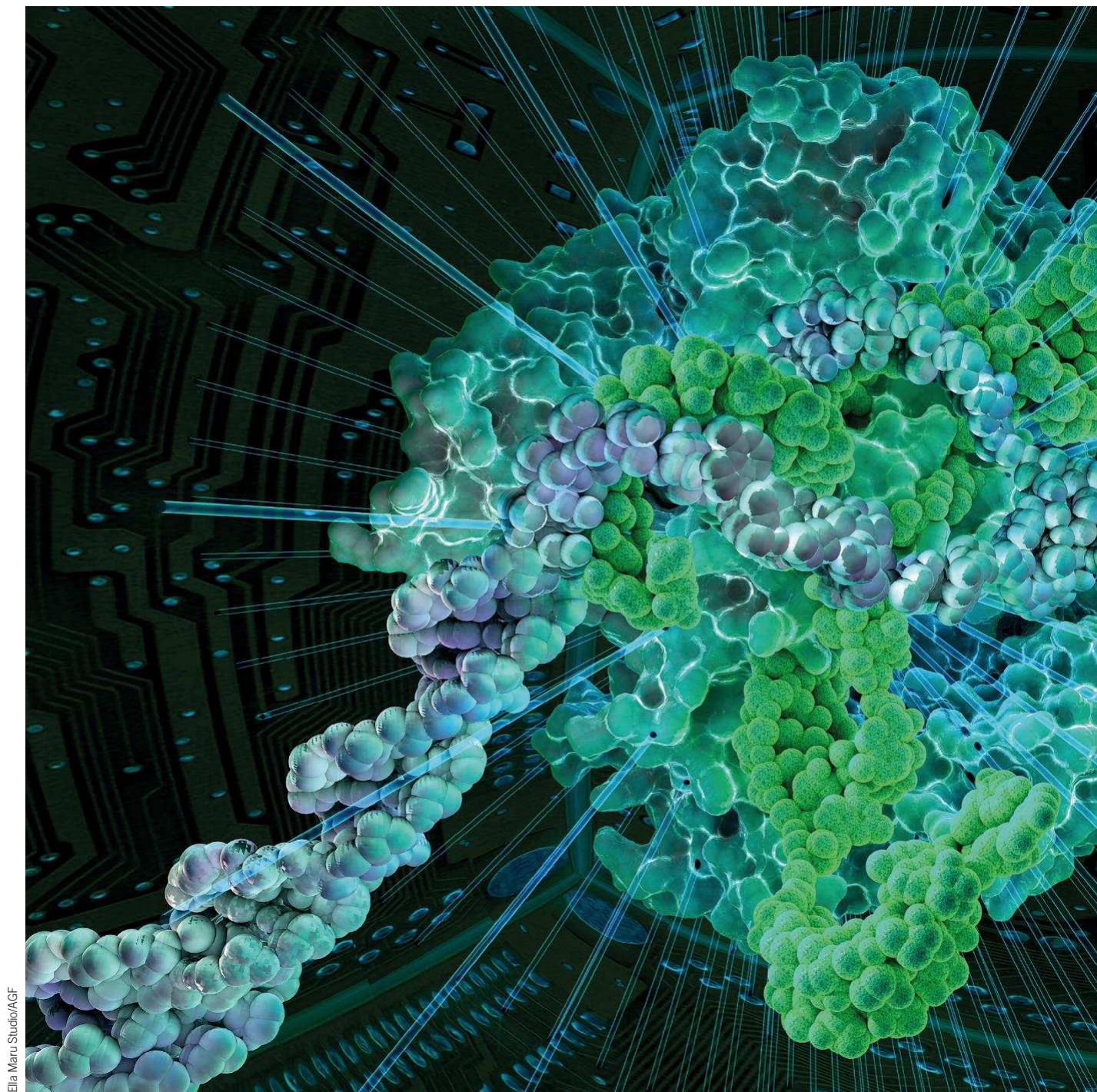
Uno studio appena pubblicato su «Physical Review D», dal titolo *Observing a wormhole*, suggerisce invece di osservare il moto delle stelle attorno al buco nero al centro della nostra galassia per capire se possa trattarsi dell'imboccatura di un wormhole (*si veda la news a p. 22*).

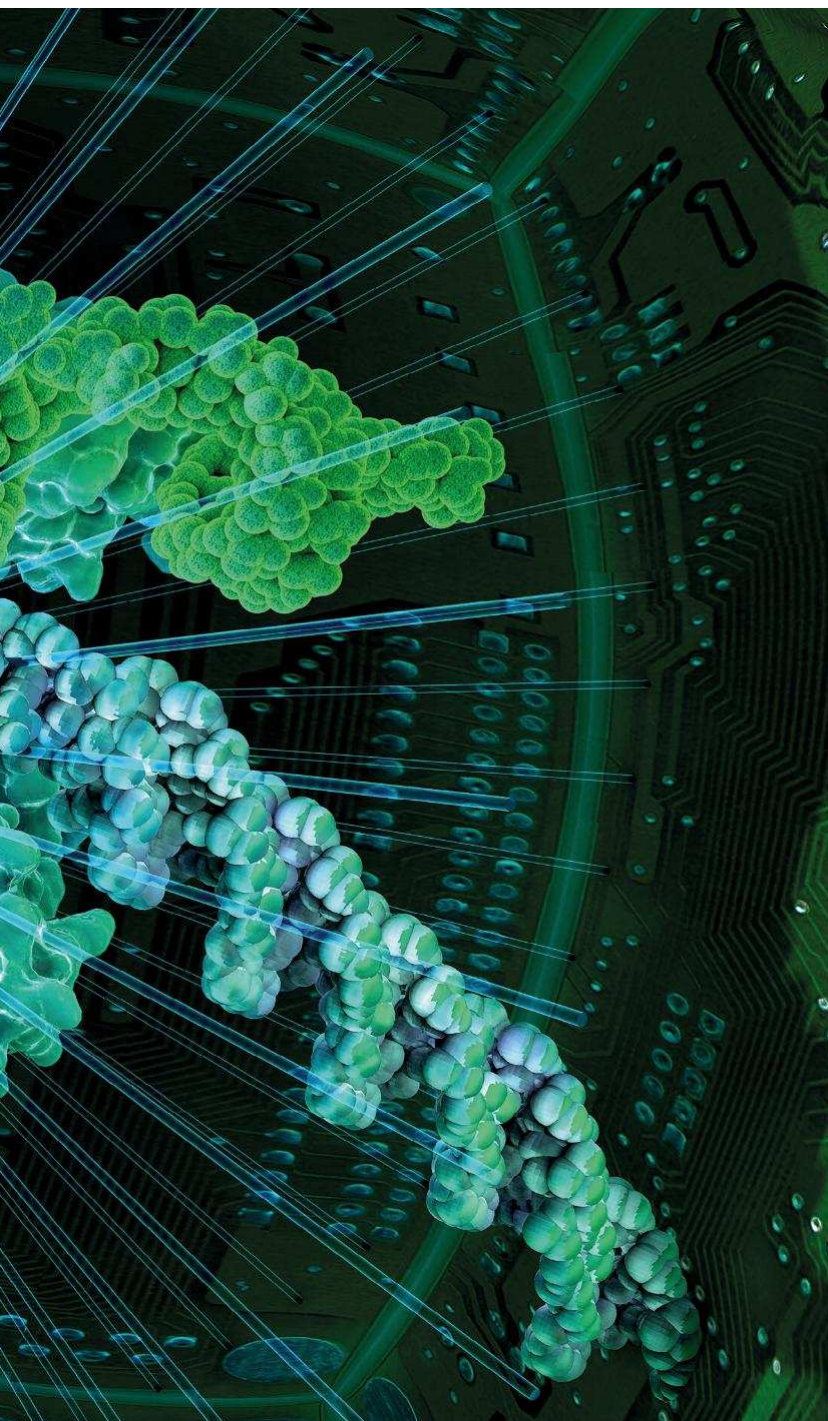
L'idea, in sostanza, è che ciò che avviene all'altro capo del tunnel deve influenzare ciò che avviene da questa parte. Lo studio esplora le conseguenze prodotte da diversi tipi di interazione, identificando quella gravitazionale come la più promettente dal punto di vista delle osservazioni. In particolare, se ci sono stelle che ruotano attorno all'uscita del wormhole, le orbite delle stelle attorno all'entrata (nel caso in esame, il centro della nostra galassia) dovrebbero risentirne, ed essere perturbate in maniera misurabile, almeno in linea di principio. Non sempre la fantascienza anticipa la realtà, ma vale la pena provare.

Event Horizon Telescope Collaboration

Testimonianza diretta. L'immagine ormai famosa del buco nero al centro della galassia M87 rappresenta la prima testimonianza diretta di un buco nero supermassiccio.

GENETICA

Meglio della CRISPR

Sviluppata una versione più versatile e precisa di questa tecnica di editing

Ella Maru Studio/AGF

Versione classica. Illustrazione della struttura molecolare del complesso CRISPR-Cas9 usato per editare genomi. L'RNA con funzione di guida è in verde scuro, l'enzima Cas9 che taglia il DNA è in grigio-verde e la doppia elica di DNA è in violetto.

Una variante più versatile e precisa promette di ampliare molto le già grandi potenzialità della CRISPR, la tecnica inventata pochi anni fa per modificare il genoma con una precisione senza precedenti. La nuova tecnica è presentata su «Nature» da David Liu, del Broad Institute di Cambridge nel Massachusetts, ed è stata chiamata *prime editing*. Applicando questo metodo a cellule in coltura, per esempio, Liu ha eliminato da un gene i quattro nucleotidi di troppo che causano la malattia di Tay-Sachs, che di solito è letale nell'infanzia; una correzione ostica per le tecniche finora esistenti. Nell'insieme, in oltre 170 interventi su una varietà di cellule umane e di topo, la tecnica ha funzionato in un'alta percentuale dei casi e con pochi effetti indesiderati. Da questi primi risultati, Liu calcola che potrebbe correggere quasi il 90 per cento delle 75.000 varianti genetiche note che causano malattie umane.

La CRISPR classica usa un RNA per guidare un enzima (Cas9) verso la sequenza genomica da modificare. L'enzima taglia in quel punto entrambe le eliche del DNA, e i meccanismi con cui la cellula ripara il DNA possono essere sfruttati per introdurre le mutazioni volute. Ma il processo è impreciso e introduce spesso altre mutazioni indesiderate, nel sito bersaglio e altrove. Il nuovo metodo usa un enzima Cas9 modificato, che taglia solo un'elica del DNA; e usa un RNA che contiene già la mutazione desiderata. Questo RNA, oltre a guidare tutto il macchinario sul punto giusto del genoma, fa da stampo per il nuovo DNA da inserire. Questo DNA viene prodotto da un altro enzima (trascrittasi inversa) e sostituisce il tratto di DNA originale. In sintesi, il prime editing contiene già la mutazione che si vuole inserire e fa meno danni al DNA. Perciò Liu lo ha definito un «trova e sostituisci» molecolare, che migliora la precisione, riduce le mutazioni indesiderate, e può creare una maggiore gamma di mutazioni. In generale, il prime editing mostra punti di forza che coprono bene i punti deboli delle altre varianti della CRISPR finora sviluppate. La tecnica classica, per esempio, resta più adatta per inserire lunghi frammenti di DNA, cosa che col nuovo metodo è difficile. Più che un unico strumento ideale, quindi, si prospetta una gamma di metodi tra cui scegliere per i diversi scopi.

Il prime editing, per la minore propensione agli errori, potrebbe essere più adatto agli usi umani come le terapie geniche. In ogni caso, è Liu il primo a frenare gli entusiasmi: il metodo andrà convalidato in molti laboratori su tanti tipi diversi di cellule e di modifiche genetiche, prima di capire dove può arrivare. «Questo è l'inizio, non la fine, della lunga aspirazione della biologia a introdurre ogni tipo di modifica in qualsiasi posizione di una cellula o di un organismo», ha dichiarato.

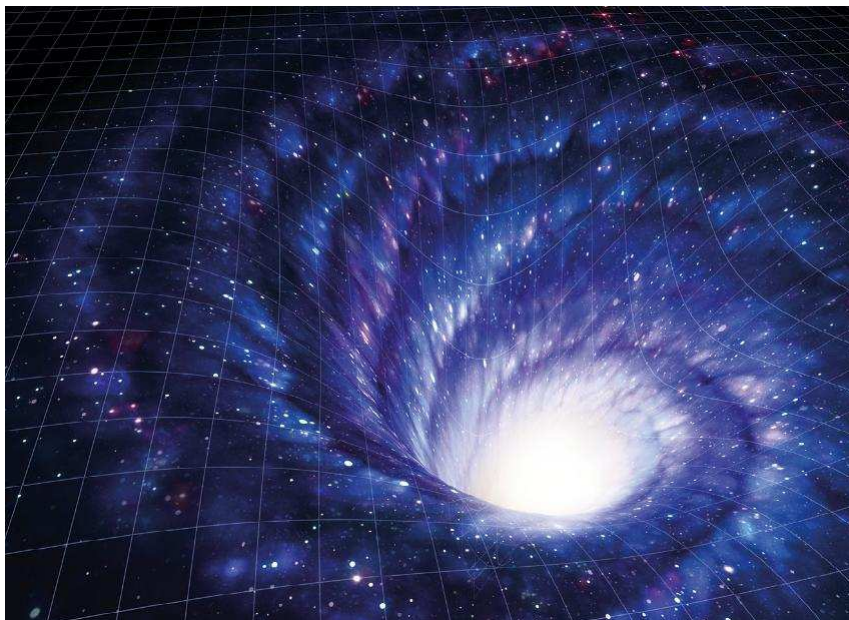
Giovanni Sabato

FISICA TEORICA

Un wormhole nella Via Lattea?

La nostra galassia potrebbe ospitare un cunicolo spazio-temporale

Il centro della Via Lattea, proprio dove si trova il buco nero supermassiccio SgrA*, potrebbe ospitare un cunicolo spazio-temporale (in inglese *wormhole*, galleria di verme). È questa l'ipotesi proposta da due ricercatori, De-Chang Dai, dell'Università di Yangzhou, in Cina, e Dejan Stojkovic, dell'Università di Buffalo, negli Stati Uniti, in uno studio pubblicato su «Physical Review D». Previsti teoricamente dalla teoria generale della relatività, ma con ancora nessuna prova sperimentale della loro esistenza, i wormhole sono tunnel che congiungono regioni diverse dello spaziotempo, potendo collegare due punti anche molto distanti fra loro, sia dal punto di vista spaziale che temporale.

Gli autori si concentrano su un particolare tipo di wormhole, definito attraversabile. Questo genere di cunicolo, che potrebbe collegare due zone del nostro universo, ma anche il nostro universo con un altro, ha la proprietà di non avere un orizzonte degli eventi e di poter essere percorso nelle due direzioni, a differenza di quanto invece accade nei ponti di Einstein-Rosen tradizionali, che alle due estremità hanno un buco nero e un buco bianco. Poiché un wormhole attraversabile può essere percorso da particelle, Dai e Stojkovic hanno verificato che può essere attraversato anche da campi di forze, come il campo gravitazionale. Così, se dall'altro lato si trova una stella, le stelle da questo lato sentono anche l'influenza gravitazionale di quella.

I due ricercatori indicano anche il modo per verificare la loro ipotesi: è sufficiente studiare con una precisione del milionesimo di metro al secondo quadrato l'accelerazione della stella S2 che orbita ad appena 17 ore luce da SgrA*. L'eventuale assenza di alterazioni nel suo moto dimostrerebbe che quello è solo un buco nero. Ma c'è già chi dubita che l'effetto sia rilevabile.

Emiliano Ricci

Sovrapposizione quantistica da record

Il confine tra il mondo quantistico e quello classico si fa sempre più sfumato. Lo dimostra un esperimento effettuato da Yaakov Fein, dell'Università di Vienna, e colleghi, che hanno verificato il principio di sovrapposizione quantistica – definito dal fisico statunitense premio Nobel Richard Feynman il «cuore» della meccanica quantistica – per una molecola formata da ben 2000 atomi: si tratta del più grande sistema fisico finora osservato che manifesti proprietà quantistiche. I risultati dell'esperimento sono stati pubblicati sulla rivista «Nature Physics».

Il principio di sovrapposizione è conseguente a una delle caratteristiche più bizzarre della meccanica quantistica, secondo cui ciascuna particella può comportarsi come un'onda. Ne è prova l'ormai classico esperimento della «doppia fenditura»: inviando un fascio di particelle verso uno schermo attraverso due fenditure, anziché osservare nello schermo la semplice immagine delle fenditure si produce una figura di interferenza, caratterizzata da massimi e minimi di densità: uno schema tipico della propagazione di onde in sovrapposizione. Questo esperimento è stato dimostrato nel tempo per elettroni, fotoni, atomi e anche piccole molecole, però non è ancora ben chiaro fino a quale scala di grandezza sia osservabile.

Dimostrare la sovrapposizione quantistica per molecole molto grandi è però una sfida difficile dal punto di vista tecnico. Fein e colleghi sono riusciti nell'impresa costruendo e mantenendo stabile una molecola composta da 2000 atomi, e inviandone un fascio attraverso un interferometro verso uno schermo, in una versione moderna dell'esperimento della doppia fenditura. Gli scienziati hanno osservato l'interferenza tra le molecole per più di sette millisecondi, un tempo sufficiente a certificare la sovrapposizione quantistica. Secondo i ricercatori in futuro il fenomeno potrebbe essere osservato anche per molecole più grandi, alimentando ancora di più il dibattito su quale sia il reale limite di validità della meccanica quantistica.

Matteo Serra

SPL/AGF

BIOLOGIA

Una vita resiliente

La biodiversità sta cambiando ma non diminuisce ovunque

vlad61/iStock

Che sia o meno il preambolo di una nuova estinzione di massa, l'attuale impoverimento della biodiversità globale è un fenomeno ormai conclamato. Tuttavia, valutarne l'entità e soprattutto le conseguenze su scala regionale rimane un compito improbo: i singoli habitat rispondono in maniera differente al cambiamento climatico e altre pressioni antropiche.

Uno studio pubblicato su «Science» dall'ecologo Shane Blowes del Centro tedesco per la ricerca sulla biodiversità integrata a Lipsia, e colleghi, rivela come, a livello locale, gli ecosistemi siano interessati da una riorganizzazione tanto rapida quanto profonda.

Attingendo dalla banca dati BioTIME – che raccoglie un vasto assortimento di serie storiche sulla biodiversità – i ricercatori hanno valutato le variazioni di abbondanza e diversità delle specie nei principali biomi del pianeta. Le analisi hanno confermato l'assenza di una tendenza univoca: se in alcuni habitat il numero di specie è diminuito, in altri è aumentato. Nel loro complesso, i ricercatori hanno osservato un incremento del numero medio di specie degli habitat locali.

Il risultato è solo apparentemente in contraddizione con l'elevato tasso di estinzione globale. «Lo studio dimostra che la biodiversità sta cambiando ma non diminuisce ovunque. In alcuni luoghi si sta riprendendo e adattando», ha riassunto la coordinatrice dello studio Maria Dornelas dell'Università di St Andrews. I ricercatori hanno osservato che la struttura degli habitat locali si riorganizza tanto rapidamente quanto di frequente: in appena un decennio, circa un terzo di tutte le specie è sostituito da altre. Rispetto agli ecosistemi terrestri, il tasso di ricambio è risultato più rapido e intenso negli oceani e in particolare nei mari tropicali, paradisi della biodiversità.

Davide Michielin

Ecco perché le uova degli uccelli hanno colori diversi

Le uova degli uccelli possono assumere una moltitudine di colorazioni, che variano dal marrone al verde-blu a seconda della specie. Ma dietro l'ampio spettro di tonalità c'è una regola molto semplice: nelle regioni della Terra dove il clima è più freddo, gli uccelli depongono uova più marroni.
Il motivo, spiega su «Nature Ecology & Evolution» un gruppo di ricercatori statunitensi e australiani coordinato da Daniel Hanley della Long Island University Post, ha a che fare con la necessità di mantenere costante la temperatura all'interno dell'uovo, da cui dipende la sopravvivenza dell'embrione. Per fare chiarezza sulla questione, gli scienziati hanno prima analizzato trasparenza e pigmentazione delle uova di più di 600 specie, e successivamente hanno misurato la quantità di calore trattenuta da gusci di colore marrone (chiaro e scuro), bianco e blu. I loro risultati hanno rivelato che i colori delle uova degli uccelli seguono uno schema ben preciso: tendono al verde e al blu nelle regioni in prossimità dell'equatore, virano verso il marrone scuro man mano che ci si avvicina ai poli.
I pigmenti del marrone, infatti, catturano meglio l'energia del Sole, permettendo all'uovo di riscaldarsi velocemente e di trattenere il calore a lungo dove le temperature sono più rigide.

Sara Mohammad

CLIMA

Agricoltura biologica e gas serra

Il calo delle rese finirebbe per far aumentare le emissioni

I benefici dei cosiddetti metodi biologici in agricoltura e allevamento sono noti da tempo: uso esclusivo di agrofarmaci naturali, minori residui di pesticidi nei prodotti, impatto contenuto su falde acquifere, biodiversità e qualità del suolo. Tuttavia, la loro sostenibilità rimane incerta poiché la resa per ettaro è in genere ben più bassa di quella dei metodi convenzionali.

Se a livello locale questo divario ha conseguenze modeste, l'adozione dei metodi biologici su scala globale pone dei seri interrogativi sulla loro capacità di sfamare la popolazione mondiale. L'agronomo Adrian Williams dell'Università di Cranfield e colleghi dell'Università di Reading, riportano su «Nature Communications» come caso di studio l'agricoltura e l'allevamento di Inghilterra e Galles. Ipotizzando una completa conversione del settore agroalimentare delle due regioni, i ricercatori hanno analizzato il ciclo di vita della filiera biologica.

Nel complesso, le emissioni dirette di gas serra risulterebbero inferiori del sei per cento rispetto allo scenario attuale: quelle rilasciate dall'agricoltura diminuirebbero del 20 per cento e quelle prodotte dall'allevamento del quattro per cento. Mantenendo però inalterata la superficie attualmente destinata al settore, la produzione crollerebbe del 40 per cento.

Se il fabbisogno interno non diminuisse in proporzione, Inghilterra e Galles dipenderanno di più dalle importazioni, acquistando e trasportando ortaggi e carne da paesi con sistemi di agricoltura intensiva. O da paesi con agricoltura biologica che però dovranno destinare una superficie di quasi cinque volte superiore a quella attualmente in uso. Indipendentemente dalla strategia adottata, la totale conversione al biologico si tradurrebbe in un aumento netto delle emissioni di gas serra.

Davide Michielin

Un carburante «verde» grazie a una foglia artificiale

Un tipo di foglia artificiale, dispositivo che imita il processo della fotosintesi, produce un gas sintetico che potrebbe essere usato per realizzare un carburante sostenibile.
È il risultato del lavoro, pubblicato su «Nature Materials» da Erwin Reisner e colleghi dell'Università di Cambridge.
Il syngas, una miscela di idrogeno e monossido di carbonio, è sintetizzato soprattutto a partire da combustibili fossili e usato per diversi prodotti: plastiche, fertilizzanti, farmaci e combustibili.
Il dispositivo sviluppato dai ricercatori di Cambridge apre alla possibilità di produrre questo gas usando solo l'energia solare.
La foglia artificiale che hanno realizzato ha due «assorbitori di luce» che, collegati a un catalizzatore, quando sono immersi in acqua producono uno ossigeno e l'altro monossido di carbonio e idrogeno. Il tutto senza rilasciare anidride carbonica (biossido di carbonio) in atmosfera.
Sarebbe quindi il punto di partenza per realizzare, in modo sostenibile, un combustibile liquido alternativo al petrolio.
Inoltre, la foglia artificiale di Reisner e colleghi si è dimostrata efficiente anche nelle giornate nuvolose. Potrebbe quindi lavorare ovunque, dal Regno Unito al Sudafrica, dall'alba al tramonto.

Enrico Nicosia

BIOLOGIA

Cromosomi dallo stesso genitore

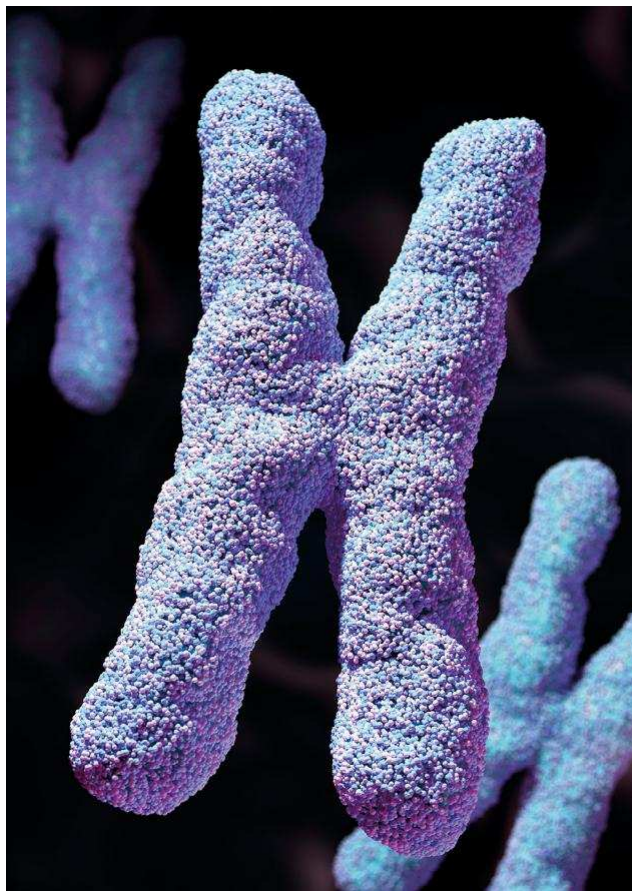
Il fenomeno è meno raro di quanto si pensava e non sempre causa scompensi

Circa 30.000 italiani avrebbero ereditato entrambe le copie di una delle 23 paia di cromosomi dallo stesso genitore, e non una dalla madre e una dal padre com'è normale. È quanto emerge dalle stime pubblicate sull'«American Journal of Human Genetics» da Priyanka Nakka, della Brown University di Providence, in uno studio effettuato con la società di test genetici 23andMe.

Il fenomeno è detto disomia uniparentale e può essere causato da vari meccanismi. Il più comune sembra un errore nella meiosi, il processo con cui le coppie di cromosomi omologhi dei genitori sono ripartite in modo che ogni ovulo o spermatozoo abbia una sola copia di ciascun cromosoma. Se per errore nel gamete restano due copie di uno stesso cromosoma parentale, l'embrione che ne deriva ne avrà tre copie. Se l'embrione sopravvive, nel primissimo sviluppo può perdere uno dei tre cromosomi e tornare alle due copie normali; che, per caso, possono essere le due provenienti dallo stesso genitore.

Finora il fenomeno era stato osservato solo nelle analisi di persone con malattie genetiche rare, e perciò lo si credeva molto sporadico e comunque causa di scompensi, perché l'attività di certi geni cambia a seconda del genitore da cui provengono. Ma l'avvento dei test genomici commerciali ha offerto una massa inedita di informazioni sulla popolazione generale. E Nakka, analizzando i dati su quasi cinque milioni di persone raccolti da 23andMe e dalla UK Biobank britannica, ha mostrato che i casi di disomia uniparentale sono circa uno su 2000, il doppio di quanto si pensava. E la gran parte dei portatori è sano. Lo studio dovrebbe rassicurare chi nei test prenatali scopre una disomia nei figli, e, come ha sottolineato Nakka, mostra quante sorprese ci riservano ancora anche i meccanismi più basilari della biologia.

Giovanni Sabato

SPL/AGF

L'amnesia immunitaria provocata dal virus del morbillo

Il virus del morbillo è in grado di resettare il sistema immunitario umano, rimuovendo porzioni di memoria immunitaria acquisita e rendendo così l'organismo maggiormente suscettibile a nuove infezioni. Lo hanno dimostrato scienziati statunitensi e di altre nazionalità studiando le cellule immunitarie prelevate da bambini e adolescenti non vaccinati prima e dopo il contagio con il virus. Le loro scoperte, illustrate in due articoli su «Science» e «Science Immunology», potrebbero spiegare per la prima volta come mai, anche a distanza di anni dall'infezione, si registrano tassi elevati di morbilità e mortalità associati al morbillo, un dato che fino a oggi veniva presentato come la conseguenza di una generica «amnesia» del sistema immunitario.

Stephen Elledge, genetista alla Harvard Medical School, ha coordinato il gruppo di ricerca che si è occupato di analizzare la varietà di anticorpi da cui dipende la capacità dell'organismo di scatenare una reazione immunitaria adeguata contro nuovi e vecchi patogeni. Elledge e collaboratori hanno scoperto che gli individui che avevano contratto il morbillo, al contrario di chi non si era ammalato o era stato vaccinato, mostravano una drastica riduzione del repertorio anticorpale, che lasciava l'organismo alla mercé anche dei virus da cui era già immunizzato. Lavorando sugli stessi campioni, il gruppo diretto da Colin Russell, dell'Università di Amsterdam, ha dimostrato che il virus compromette l'attività dei linfociti B (le cellule produttrici di anticorpi), riportando il sistema immunitario allo stato di immaturità in cui si trova nei neonati.

Entrambi i gruppi non hanno potuto indagare le conseguenze cliniche delle proprie scoperte; i dati epidemiologici e gli studi compiuti su modelli animali suggeriscono però che questa sia la spiegazione finora più plausibile dei meccanismi biologici alla base dell'amnesia immunitaria causata dal virus del morbillo, oltre a confermare l'utilità di una corretta vaccinazione.

Sara Mohammad

Nei laghi è boom misterioso di fioriture algali

Le acque del lago Balaton, nell'Ungheria occidentale, sono più pulite oggi di quanto non fossero anni fa. Ma è un caso isolato: la maggior parte dei laghi è stata intossicata da fioriture algali sempre più intense e a farne le spese sono animali, piante e anche la nostra salute, poiché si rischia di respirare vapori tossici o consumare acqua e prodotti ittici contaminati da tossine algali.
A scriverlo su «Nature» è un gruppo di ricercatori coordinati da Jeff C. Ho della Stanford University che hanno analizzato le immagini satellitari scattate dalla NASA per 71 laghi in 33 paesi. È così emerso che dal 1984 al 2012, il 68 per cento degli specchi d'acqua è stato interessato da una significativa esplosione di fioriture, mentre solo l'otto per cento ha avuto una diminuzione significativa delle maree algali. La causa di questa *escalation* non è chiara. A intensificare la riproduzione delle microalghe del fitoplancton è l'aumento dei nutrienti riversati nelle acque (di cui sono responsabili soprattutto i fertilizzanti agricoli e l'inefficiente depurazione delle acque reflue), dallo studio però non è emersa una robusta correlazione tra i due eventi.
È vero tuttavia che i laghi più in salute sono quelli che negli anni si sono scaldati di meno, per questo si teme che l'aumento delle temperature favorirà fioriture via via più abbondanti. (*MaSa*)

Gli effetti della tempesta sul pericolo valanghe

A fine ottobre 2018 l'Italia è stata interessata da fortissimi venti sciroccali. Quando in questo flusso si sono inseriti una profonda depressione e un fronte freddo, nella parte nord-orientale si sono verificate piogge molto intense e venti che hanno raggiunto i 200 chilometri orari. In particolare, sono andati distrutti circa 42.000 ettari di bosco, per un totale di oltre otto milioni di metri cubi di legname. Ma ci sono conseguenze della tempesta a cui si pensa raramente. Per esempio, che cosa implica la distruzione di questi alberi per la stabilità dei versanti? Ci sono effetti per il rischio valanghe? È quanto si sono chiesti Mauro Valt, del Centro valanghe di Arabba, in provincia di Belluno, e colleghi in un lavoro pubblicato su «Neve e Valanghe».

In attesa di approfondimenti su riviste internazionali, con le immagini del satellite Sentinel-2 gli autori hanno individuato e quantificato le porzioni di bosco distrutto. Hanno poi stabilito dove la distruzione del bosco ha annullato la capacità di protezione da frane e valanghe che gli alberi forniscono rispetto ai territori a valle. Si sono individuate quindi nuove aree valanghive e si è potuto valutare il rischio in certe condizioni nevose. Uno studio interdisciplinare che quantifica un rischio inaspettato o sottovalutato. (*AnPa*)

Ricostruita in 3D la struttura sepolta dei Campi Flegrei

La caldera dei Campi Flegrei ha prodotto eruzioni in grado di coprire di cenere intere regioni: non sorprende che si cerchi di mapparne le strutture profonde per capire che cosa ci si debba aspettare da esse.
Un nuovo sistema, di buona risoluzione ed economico, è stato ora sperimentato dal geofisico Roberto Isaia, dell'Istituto nazionale di geofisica e vulcanologia. Come riportato su «Scientific Reports», invece di usare sismometri ed esplosioni, problematici in un'area abitata, i ricercatori hanno inserito un elettrodo nel terreno, rilasciando da esso impulsi a dieci ampere, che venivano ricevuti da altri 12 elettrodi infissi a grande distanza. Dai dati sulla resistività del sottosuolo, un computer ha ricostruito una tomografia delle rocce della caldera, fino a una profondità di 400 metri, evidenziando, per esempio, la forma a imbuto del vulcano sotto alla zona chiamata Solfatara, in grado di raccogliere l'acqua che poi fuoriesce in superficie come vapore.
«Abbiamo ricostruito per la prima volta nel dettaglio le strutture di profondità di Solfatara, Pisciarelli e piana di Agnano, un'area di quattro chilometri fra quelle a maggiore probabilità di eruzione», spiega Isaia. «I risultati ottenuti ci aiuteranno a sviluppare modelli destinati a comprendere l'evoluzione dei fenomeni idrotermali e sismici della zona.» (*AlSa*)

R Tscherwitschke/CHR/AGF (*valanga*);Mimmo Frassineti/AGF (*Solfatara*)

Neanderthal sempre più abili

Una piccola selce incatramata scoperta nei Paesi Bassi ribadisce che i Neanderthal avevano sofisticate capacità di pianificazione. La selce risale di 50.000 anni fa, spiega sui «Proceedings of the National Academy of Sciences» Paul Kozowyk, dell'Università di Leida. Lo spesso strato di catrame che ne avvolge un'estremità aiutava a maneggiarla con più destrezza. Una miglioria all'apparenza banale, ma che richiede di saper organizzare un lavoro complesso su più giorni.

L'analisi ha rivelato che il catrame è ricavato da corteccia di betulla, e Kozowyk ne ha ricostruito il presumibile processo produttivo: bisognava raccogliere le strisce di corteccia, ricoprirle d'argilla, farci sopra un fuoco ad alta temperatura, attendere un certo tempo e poi raccogliere in quantità il catrame prodotto.

Qualche uso del catrame era già noto altrove. Ma che i neanderthaliani si siano dati la pena di incatramare anche uno strumento così grezzo, anche nei piccoli gruppi che abitavano l'estremo nord della loro area di distribuzione, suggerisce a Kozowyk che la fabbricazione del catrame fosse una *routine* consolidata (c'è però chi attende conferme per convincersene). Se ne conosciamo solo pochi esempi è perché solo di rado si sarebbe conservato fino a noi. (*GiSa*)

Riduzione record per il buco dell'ozono

Dal 1982, ossia a partire da quando è stato scoperto, sino a oggi, il buco dell'ozono sopra il Polo Sud non è mai stato così piccolo.

Lo hanno annunciato le statunitensi NASA e NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) alla fine di ottobre, quando i loro satelliti hanno rilevato che il «buco» sopra l'Antartide si era ridotto fino a raggiungere i dieci milioni di chilometri quadrati di estensione.

Anche se il risultato appare senza dubbio incoraggiante, il fenomeno registrato dalle agenzie statunitensi è dovuto soprattutto a un aumento anomalo delle temperature stagionali a livello della stratosfera. Il buco dell'ozono, infatti, che consiste in una riduzione ciclica dello strato di ozono stratosferico (ozonosfera) a livello delle aree polari, si allarga e si restringe nel corso di ogni anno. In primavera, per esempio, lo strato di ozono sopra il continente antartico può diminuire fino al 71 per cento. Ciononostante, i progressi sulla riduzione graduale del buco dell'ozono, seppure molto lenti, sono ancora in corso, e ogni dieci anni viene recuperato dall'1 al 3 per cento dello strato di ozono andato perso. Per quanto riguarda la sola Antartide, i ricercatori stimano che ci vorranno almeno altri 50 anni per tornare ai livelli del 1980. (*MaMa*)

Il VLT vede la ragnatela cosmica

Il modello cosmologico standard del big bang caldo prevede che il 60 per cento dell'idrogeno primordiale si disponga lungo filamenti, in una sorta di ragnatela cosmica. Nelle regioni in cui questi filamenti si intersecano o sono più densi vanno a formarsi le galassie. Proprio il gas intergalattico distribuito nei filamenti contribuisce alla crescita delle galassie, fornendo materiale per la formazione stellare e per alimentare i buchi neri supermassicci che si trovano al centro di queste. Ma data l'estrema difficoltà di osservare queste strutture, molto tenui e poco luminose, la loro rilevazione è recente.
Ora, un gruppo dell'Università di Tokyo, ha studiato con il Very Large Telescope dell'European Southern Observatory l'ammasso primordiale di galassie SSA2, distante 12 miliardi di anni luce, con l'obiettivo di confermare l'esistenza di questa ragnatela cosmica. Descritte su «Science» da Hideki Umehata e colleghi, le osservazioni mostrano lunghi filamenti di gas intergalattico, estesi oltre tre milioni di anni luce, la cui distribuzione e dinamica confermano quanto previsto dai modelli di formazione delle galassie. (*EmRi*)

ESO/Y. Beletsky

I muschi raccontano l'ultimo viaggio di Ötzi

A quasi trent'anni dal suo ritrovamento in un valico alpino a confine con l'Austria, la mummia dell'uomo del Similaun, od Ötzi, si conferma una miniera inesauribile di informazioni. Uno studio coordinato dall'archeobotanico James Dickson dell'Università di Glasgow, e pubblicato sulla rivista «PLoS One», ha catalogato l'ampia biodiversità di muschi e piante epatiche rinvenute insieme alla celebre mummia a 3200 metri d'altitudine. Solamente 23 specie di briofite crescono oggi nell'area, un'abbondanza ritenuta simile a quella di 5000 anni fa.
Basandosi sulle numerose indagini botaniche compiute nella regione, i ricercatori hanno ricostruito la distribuzione delle 75 specie vegetali identificate nel tratto digestivo di Ötzi e nei sedimenti attorno al corpo. Il 30 per cento delle piante è risultato autoctono.
Sebbene sia possibile che alcune specie siano state trasportate nel sito di ritrovamento dal vento o da animali, la presenza di alcuni muschi ed epatiche provenienti da altitudini modeste ha permesso di stabilire da dove era arrivato Ötzi.
Poiché queste specie sono assenti nel versante austriaco mentre prosperano in quello italiano, gli autori hanno concluso che Ötzi abbia raggiunto il valico da sud, risalendo il corso del Rio Senales. (*DaMi*)

SALUTE RIPRODUTTIVA FEMMINILE

Terreno

La salute riproduttiva in Italia è ancora un tabù, almeno a giudicare dai dati discussi in questo dossier di «Le Scienze». Secondo uno studio coordinato dall'Istituto superiore di Sanità, che ha riguardato studenti tra i 14 e i 18 anni di età, in famiglia difficilmente si discute di argomenti come «sviluppo sessuale e fisiologia della riproduzione», «infezioni/malattie sessualmente trasmissibili» e «metodi contraccettivi». Quando poi si passa alla pratica, un adolescente sessualmente attivo su dieci non usa metodi contraccettivi, nemmeno il coito interrotto. C'è poi il capitolo della disinformazione: solo la metà degli intervistati sa che «per una donna è più probabile rimanere incinta se ha rapporti sessuali nei giorni a metà tra una mestruazione e l'altra».

Gli adulti non se la passano meglio. Il nostro paese registra percentuali di uso di contraccettivi più bassi del resto dei paesi dell'Europa occidentale. E l'obiezione di coscienza rimane un tema cruciale, visto il numero elevato di operatori sanitari che esercitano questo diritto, rendendo complicato non solo il ricorso all'IGV ma anche quello al *counselling* anticoncezionale nei consultori. Il dato più inquietante, però, è quello della mortalità materna. Il primo rapporto nazionale sull'argomento presentato a marzo 2019 indica che questi decessi sono molto più alti di quanto ritenuto in precedenza.

Nel frattempo la scienza del settore avanza, ed emergono nuovi fenomeni sociali. Negli Stati Uniti sempre più donne sufficientemente giovani congelano i propri ovociti per un eventuale uso successivo. In Italia siamo ancora ai livelli statunitensi, ma gli addetti ai lavori iniziano a discuterne.

Gli scienziati cominciano a saperne di più pure sulle mestruazioni, altro argomento marchiato da un tabù che per lungo tempo ha bloccato studi su questo fenomeno fisiologico, con gravi rischi per le donne. Il quadro dunque è chiaro. Ancora nel XXI secolo, la salute riproduttiva al femminile è un diritto da difendere, anche con il contributo della comunità scientifica.

La redazione

30 **Fine di un ciclo**
I tabù sulle mestruazioni femminili hanno frenato le ricerche sul funzionamento e le alterazioni del ciclo

38 **Riproduzione sicura?**
Morti da parto, basso uso di contraccettivi e disinformazione: in Italia abbiamo qualche problema

44 **I numeri della salute**
Una serie di infografiche sul fenomeno della mortalità materna e sulla contraccezione in Italia, con dati regionali

48 **Ovuli al fresco**
Congelare ovociti in attesa del momento per usarli è la nuova frontiera della procreazione medicalmente assistita

Tra tabù che non scompaiono, rischi inaspettati e nuovi fenomeni sociali dettati dagli avanzamenti della scienza, la salute riproduttiva delle donne è ancora un diritto da difendere

Blaine Harrington III/Getty Images

Fotografia di Jamie Chung

FISIOLOGIA

Fine di un ciclo

Tabù vecchi di secoli hanno frenato le ricerche sul funzionamento del ciclo femminile, con gravi conseguenze per la salute delle donne

di Virginia Sole-Smith

IN BREVE

Le mestruazioni sono essenziali per la riproduzione umana, e quindi per la sopravvivenza della specie. Siamo tra i pochi animali ad avere un ciclo mestruale.

Eppure, per lungo tempo, le mestruazioni sono state un tabù, e lo sono ancora oggi in alcuni contesti religiosi e culturali.

Una conseguenza di questo tabù è che solo verso la fine degli anni ottanta gli scienziati hanno iniziato davvero a cercare di capire perché si verificano le mestruazioni.

Inoltre, negli anni sessanta, con l'arrivo sul mercato della pillola anticoncezionale, la relazione tra ciclo mestruale e salute delle donne ha acquisito ulteriore importanza, se si considera anche l'uso della pillola per saltare il ciclo, oppure evitarlo del tutto, per esempio in caso di mestruazioni problematiche.

Virginia Sole-Smith è una giornalista che si occupa di femminismo, immagine del corpo e salute per «New York Times Magazine», «Harper's Magazine», «Elle» e moltre altre pubblicazioni. È autrice del libro *The Eating Instinct: Food Culture, Body Image, and Guilt in America* (Henry Holt, 2018).

Nel 2007 Susan Brown ha visto con i suoi occhi il potere repulsivo esercitato dal sangue mestruale. Stava conducendo una ricerca sul fluido mestruale come indicatore della salute femminile e, oltre ai campioni di studentesse volontarie dell'Università delle Hawaii a Hilo, dove lavorava come psicologa evoluzionistica, voleva dati da una sezione trasversale di volontarie. Il suo gruppo di ricerca ha quindi messo un banchetto all'entrata di un Walmart nel centro della cittadina con un cartello che diceva «Ricerca sul ciclo mestruale». Poi gli scienziati hanno aspettato. Per tutto il pomeriggio, donne e uomini hanno visto il cartello e hanno affrettato il passo evitando il contatto visivo.

Dopo circa sei mesi, Brown e la sua collega Lynn Morrison hanno presentato i loro risultati all'incontro annuale dell'American Association of Physical Anthropologists. Non appena Morrison ha descritto il trasporto di campioni di sangue mestruale lungo il corridoio del loro laboratorio per l'analisi dei livelli ormonali e di altri biomarcatori, in sala si è diffuso un «brusio nervoso». «Il pubblico era a suo agio a discutere di ciclo mestruale in termini astratti, ma parlare specificatamente di sangue mestruale ha generato imbarazzo», racconta Brown.

Una simile avversione non ha influenzato solo il rapporto che le donne hanno con il proprio corpo ma anche il modo in cui la classe medica gestisce i loro problemi di salute riproduttiva. «Il tabù mestruale è centrale nel modo in cui si fa scienza», è il giudizio di Brown sulla ricerca nel campo delle mestruazioni.

O non si fa scienza, sarebbe più corretto dire. Difficile calcolare quanto si spenda per la ricerca sulle mestruazioni, ma gli esperti concordano che è finanziata in modo insufficiente. «È un po' come la storia dell'uovo e della gallina, dove non ci sono molti finanziamenti per la ricerca, non ci sono neanche i dati per quantificare la mancanza di ricerca», commenta Elizabeth Yuko, che si occupa di bioetica alla Fordham University.

I disturbi del ciclo però sono incredibilmente comuni. In uno studio del 2018 alcuni ricercatori dell'Arabia Saudita hanno fatto un sondaggio su 738 studentesse, scoprendo che il 91 per cento del campione riferiva almeno un problema mestruale: per alcune si trattava di mestruazioni irregolari oppure assenti, altre invece lamentavano perdite eccessive e dolori intensi. Diversi studi dimostrano che fino a una donna su cinque soffre di crampi forti abbastanza da limitare la vita quotidiana. Nel mondo, quasi una donna su 16 soffre di endometriosi, ovvero la migrazione di tessuti e sangue mestruale al di fuori dell'utero che provoca dolorose lesioni nella cavità pelvica. E una donna su dieci ha la sindrome da ovaio policistico, uno squilibrio ormonale che genera irregolarità nel ciclo ed è tra le prime cause di infertilità. «Qualcuno potrebbe dire che bisogna concentrare le risorse sulle questioni di vita o di morte – dice Yuko – ma questa argomentazione non regge perché non abbiamo problemi nel finanziare la ricerca sulla disfunzione erettile».

Le mestruazioni, ovviamente, sono essenziali per la riproduzione umana, e quindi per la sopravvivenza della specie. È anche uno dei processi biologici che ci rendono speciali perché esseri umani, scimpanzé, pipistrelli e topiragno elefanti sono tra le poche specie animali ad avere il ciclo. La stragrande maggioranza dei mammiferi segnala la fertilità attraverso l'estro, il periodo in cui le femmine ovulano e mostrano ricettività sessuale mediante turgidità genitale, cambiamenti comportamentali o evidenti alterazioni nell'odore corporeo. Il corpo umano femminile invece nasconde questa finestra critica. Il nostro segno più visibile di potenziale fertilità è il sangue mestruale che, ironia della sorte, si manifesta alla fine del periodo fertile. Il rivestimento endometriale dell'utero si ispessisce durante il ciclo femminile e i livelli di estrogeni aumentano. Se nessuno degli ovuli rilasciati al momento dell'ovulazione si unisce a uno spermatozoo e si impianta in quel rivestimento come zigote fecondato, i livelli di estrogeni e quelli di un altro ormone, il progesterone, scendono dando il via allo sfaldamento dell'endometrio ispessito per ricominciare da capo al ciclo successivo.

Ma, al di là di questo quadro generale, gli scienziati stanno ancora cercando una risposta ad alcune domande fondamentali. Perché condividiamo questo processo con almeno sei specie di pipistrello ma nessuna scimmia? E che cos'è esattamente il sangue mestruale? «È diverso dal resto del sangue», fa notare Brown. «Sappiamo che non coagula e che è ricco di agenti immunitari, ma non sappiamo molto sul loro ruolo». Non è neanche chiaro perché questo tessuto biologico si sfaldi in modo così marcato quando la maggior parte dei mammiferi riassorbe il rivestimento endometriale alla fine dell'estro. Ancora meno si sa sul perché così tante donne – fino all'80 per cento secondo alcune stime – soffrano di

Le coppette sono un'alternativa riutilizzabile ed ecosostenibile a tamponi e assorbenti.

Rocky89/iStock

sintomi come crampi, gonfiore, stanchezza o irritabilità, tra gli altri, nei giorni precedenti alle mestruazioni. «Sappiamo poco sulle mestruazioni», conferma Tomi-Ann Roberts, presidente della Society for Menstrual Cycle Research e professoressa di psicologia al Colorado College, e quello che sa la scienza spesso è divulgato male. «Per questo mostriamo un atteggiamento profondamente negativo nei confronti delle mestruazioni, con ripercussioni concrete su quando inizieremo a capire le mestruazioni regolari, come anche i disturbi correlati e i trattamenti disponibili».

Nascondere le mestruazioni

Il tabù ha assunto molte forme. Nel 1920 un pediatra di origine ungherese che lavorava a Vienna, Béla Schick, pubblicò una raccolta di osservazioni aneddotiche: una volta aveva dato fiori a una donna con le mestruazioni e i fiori sono appassiti in pochi minuti. Un'altra volta aveva confrontato il pane preparato da diverse donne, e quello della donna mestruata era lievitato del 22 per cento in meno. Schick aveva concluso che il sangue mestruale conteneva una sorta di veleno. Agli inizi degli anni cinquanta gli scienziati della Harvard University avevano fatto riferimento a «menotossine» e avevano iniettato sangue mestruale in animali per osservarne gli effetti. Alcuni esemplari erano morti, molto probabilmente perché i campioni contenevano batteri e altri contaminanti. Non si è ottenuto molto da questi esperimenti in termini di dati utili, ma l'idea che il sangue mestruale abbia proprietà misteriose, se non pericolose, si è radicata nella letteratura scientifica e nell'immaginario culturale.

Alla fine degli anni cinquanta la ricerca sulle mestruazioni si è concentrata quasi interamente su come evitare le gravidanze indesiderate in un momento in cui le cifre di mortalità materna e neonatale erano allarmanti, in particolare tra le classi sociali più basse. Nel 1923 Margaret Sanger, infermiera e fondatrice delle organizzazioni successivamente confluite nell'organizzazione no profit Planned Parenthood, aveva scritto: «Il controllo delle nascite significa liberazione per donne e uomini». Nel 1951 Sanger incontra un fisiologo, Gregory Pincus, che aveva realizzato quella che all'epoca era ritenuta la prima fecondazione *in vitro* di un coniglio. Con Sanger a garantire i finanziamenti, Pincus allestisce un laboratorio per testare varie formule della versione sintetica degli ormoni che regolano il ciclo mestruale e, con la collaborazione di John Rock, ginecologo e ostetrico di Boston, effettua trial clinici sul farmaco.

Dopo uno studio su quasi 60 donne dell'area di Boston, Pincus e Rock volano a Puerto Rico per il primo trial su larga scala della molecola che nel 1960 sarebbe diventata il primo contraccettivo orale approvato dalla statunitense Food and Drug Administration. I due scienziati reclutano 265 donne portoricane, molte delle quali povere, senza il livello di «consenso informato» richiesto oggi. Il 22 per cento delle partecipanti si ritira dopo aver segnalato effetti collaterali come nausea, capogiri, cefalea e vomito. Il direttore medico dello studio sostiene che la pillola «causa troppe reazioni avverse per essere generalmente accettabile». Nonostante tutto, viene messa sul mercato.

Ovviamente la pillola è stata celebrata come una rivoluzione. «Era la prima forma di controllo delle nascite separata del sesso che le donne potevano controllare completamente», fa notare Elizabeth Kissling, professoressa di studi su donne e genere alla Eastern Washington University. È impossibile esagerare la libertà che la pillola ha rappresentato per le donne, le cui vite riproduttive erano altrimenti sotto il controllo maschile. Ma questa liberazione ha avuto un prezzo. Verso la fine degli anni sessanta, pazienti in tutti gli Stati Uniti hanno riferito gli stessi sintomi documentati nel trial portoricano. E, nonostante molte riformulazioni nei decenni successivi, gli effetti collaterali sono ancora un problema per le donne che prendono la pillola; il rischio di tumore

alla mammella, trombi e ictus potrebbe essere anche più alto. Cercando un modo per regalare libertà riproduttiva alle donne, Sanger, Pincus e Rock sembrano aver ignorato le implicazioni legate all'interruzione di un ciclo naturale femminile, spiega Kissling. In altre parole, gli scienziati sono riusciti a soppiantare le mestruazioni prima di aver provato a capirne il funzionamento.

È solo verso la fine degli anni ottanta che gli scienziati hanno iniziato davvero ad affrontare la domanda più grande, quella sul perché si verificano le mestruazioni. Mentre era ancora una studentessa, la biologa dell'evoluzione Beverly I. Strassmann ha scritto un articolo su come la capacità di nascondere l'ovulazione potrebbe attrarre più partner maschili. Poiché la finestra fertile di una donna è più o meno invisibile, incoraggia quello che i ricercatori chiamano il legame di coppia: i maschi della nostra specie investono in meno relazioni sessuali e si prendono cura della prole che ne risulta per assicurarsi la paternità. Strassmann, che oggi insegna antropologia all'Università del Michigan, voleva esplorare l'atteggiamento umano nei confronti delle mestruazioni raccogliendo dati in una comunità in cui le donne trascorrono cinque notti del loro ciclo mestruale dormendo in capanne separate dal resto della tribù.

Nel 1986 Strassmann è andata in Mali per una ricerca sul campo tra i Dogon, un gruppo etnico di coltivatori di miglio molto legato alle proprie tradizioni. I Dogon che praticano ancora la loro religione indigena credono che la presenza di una donna con le mestruazioni profani gli oggetti religiosi nei terreni di famiglia. In passato i ricercatori non avevano ritenuto che simili credenze religiose fossero radicate in ogni tipo di programmazione della riproduzione. Ma, come spiega Strassmann, lei stessa aveva ipotizzato che fosse «uno schema culturale integrato nella religione a diretto servizio della riproduzione». Sebbene la ricerca sulle moderne comunità indigene permetta solo di intuire come vivevano gli esseri umani migliaia di anni fa, Strassmann sperava di dimostrare che antichi tabù culturali sulle mestruazioni si erano sviluppati a sostegno dei nostri obiettivi evolutivi.

Pratiche religiose in tema di mestruazioni sono riconducibili alla necessità maschile di monitorare la fertilità femminile e di programmare l'attività sessuale

Nel suo lavoro iniziale sul campo, Strassmann ha studiato l'uso delle capanne mestruali per quasi tre anni, raccogliendo campioni di urine da 93 donne per misurare i livelli ormonali e dimostrare che l'uso delle capanne era correlato allo schema mestruale. Ha poi osservato la rapidità con cui la maggior parte delle donne restava incinta dopo la permanenza nelle capanne. Anche se la pratica mirava evidentemente a segregare le mestruazioni, le capanne erano in piena vista davanti a un riparo ombreggiato usato da uomini della comunità. Così, le capanne rendevano chiaro lo stato fertile di una donna al marito e alla famiglia del marito, che a lei piacesse o meno. Come già osservato, le donne entrano nel loro «periodo fertile» dopo le mestruazioni.

Altre pratiche religiose in tema di mestruazioni, come il rito di purificazione praticato dagli ebrei ortodossi che prevede che le donne mestruate debbano immergersi nel bagno *mikveh*, sono riconducibili alla necessità maschile di monitorare la fertilità femminile e programmare di conseguenza l'attività sessuale. E sebbene la pillola permetta alle donne di autodeterminare la propria vita riproduttiva, rendendo vane simili pratiche, i tabù resistono, dice Roberts. «Continuiamo a pensare alle mestruazioni come a qualcosa che le donne devono tenere separato e nascosto».

Evoluzione delle mestruazioni

Il lavoro di Strassmann mirava soprattutto a capire le basi biologiche dei tabù mestruali, ma i suoi dati hanno svelato anche caratteristiche importanti sulle stesse mestruazioni. Nel 1997 su «Current Anthropology» è stato pubblicato quello che forse è il suo lavoro più citato: nel corso della storia umana, il ciclo mestruale non è stato un evento così frequente. Questo perché, nelle comunità in cui i sistemi anticoncezionali sono assenti o difficilmente accessibili, le donne tendono a restare incinte prima, a fare più figli e ad allattare più a lungo rispetto alle comunità con un alto tasso di controllo delle nascite. «Pensiamo che ci siano 12 cicli mestruali all'anno, ma se si è incinta e poi si allatta per lunghi intervalli di tempo, può esserci un periodo di due o tre anni per ogni figlio in cui non si verificano mestruazioni», spiega Strassmann. I dati che ha raccolto hanno dimostrato che negli anni ottanta le donne dogon avevano in media 100 cicli mestruali nella vita contro i 400 delle donne statunitensi. E l'esperienza delle donne dogon è molto simile a quella di ogni altra donna prima dello sviluppo della pillola.

La scarsa frequenza storica delle mestruazioni contribuisce a spiegare perché l'evoluzione umana ci spinga a fare qualcosa di potenzialmente così svantaggioso come perdere sangue e quindi ferro, proteine e altri nutrienti, e probabilmente attirare predatori. Ci aiuta anche a capire perché le mestruazioni e la settimana che le precede possano essere così spiacevoli per molte donne. Michael Gillings, professore di evoluzione molecolare alla Macquarie University, in Australia, ha iniziato a interessarsi della sindrome premestruale (SPM), comune a tante donne, quando è stato aggiunto il disturbo disforico premestruale (DDPM) alla quinta edizione del *Manuale diagnostico e statistico dei disturbi mentali*, nel 2013.

La definizione di DDPM è grave irritabilità, depressione o ansia nella settimana o due precedenti alle mestruazioni, con un'attenuazione dei sintomi due o tre giorni prima dell'inizio delle stesse mestruazioni. Ma Gillings, con altre studiose femministe, esitava a caratterizzare gli sbalzi umorali come un disturbo. «Fino all'80 per cento delle donne riferisce i sintomi, significa quindi che la SPM è la norma, non un disordine», dice. «Dobbiamo chiederci se in un dato momento storico non fosse un vantaggio avere questi sintomi». Nel 2014 ha pubblicato un articolo su «Evolutionary Applications» argomentando che la SPM offriva un vantaggio selettivo causando tensioni nel legame di coppia e aiutando potenzialmente le donne a interrompere i rapporti con gli uomini sterili. «È un'ipotesi difficile da dimostrare», ammette. I mezzi di comunicazione lo hanno dipinto come un uomo insensibile alla sofferenza delle donne. «Sono stato fatto a pezzi in cinque continenti», dice. Alcuni scienziati contestano l'ipotesi di Gillings per cui la SPM sarebbe il risultato dell'evoluzione e sostengono che le radici siano più culturali che biologiche, perché si manifestano in modo diverso nel mondo. Secondo Roberts, su questo concetto pesa il tabù mestruale e ci vede un modo per liquidare le emozioni femminili.

Gli scienziati sono divisi anche sull'idea per cui le perdite di sangue abbiano uno scopo evolutivo. «Non ho mai capito il senso di perdere sangue quando gli altri animali lo riassorbono», afferma Brown. Ora molti biologi dell'evoluzione ritengono che la caratteristica fondamentale del ciclo femminile non sia il sangui-

Il ciclo mestruale

L'essere umano è tra le poche specie animali ad avere le mestruazioni. Il ciclo inizia nel cervello, che invia segnali all'ipofisi (*non mostrata*) per produrre ormoni che stimolano le ovaie. Nelle ovaie ci sono i follicoli che rilasciano un ovulo durante l'ovulazione. Anche le ovaie secernono ormoni per preparare l'utero a ospitare l'embrione in caso di fecondazione dell'ovulo da parte di uno spermatozoo. Se non si impianta nessun embrione, l'utero si disfa del suo rivestimento e il ciclo ricomincia.

Il ciclo mestruale è in media di 28 giorni, ma la sua durata è molto variabile da donna a donna. Non è raro che un ciclo sia sistematicamente più lungo o più corto. E, per circa un terzo delle donne, una volta all'anno il ciclo può essere in anticipo o in ritardo anche di due settimane.

Giorno del ciclo

DURATA

MESTRUAZIONI

CICLO UTERINO

Livelli di ESTRADIOLO e PROGESTERONE

CICLO OVULATORIO

Livelli di LH e FSH

15 UI/L

10 UI/L

5 UI/L

Follicoli nell'ovaio

Si sviluppa il follicolo dominante

Ovulazione

Ovulo

Corpo luteo

C'è una probabilità significativa che un ciclo risulti anovulatorio, ovvero non sono rilasciati ovuli. Analogamente, a volte sono rilasciati e fecondati più ovuli, portando a una gravidanza di gemelli dizigoti o multipli di ordine superiore.

L'ovulo è disponibile per la fecondazione per circa 24 ore

*Bassi livelli ormonali possono persistere anche in assenza di produzione attiva di ormoni da parte delle ovaie.

Disegno di Federica Fragapane; fonte: *Circulating Immunoreactive Inhibin Levels during the Normal Human Menstrual Cycle*, di Mclachlan R.I. e altri, in «Journal of clinical Endrocrinology and Metabolism», Vol. 65, 1987 (*dati sui livelli ormonali*); PRIOR J.C. Università della British Columbia, Center for Menstrual Cycle and Ovulation Research (*consulenza*)

PUBERTÀ ANTICIPATA

Perché le ragazze hanno lo sviluppo così precoce?

L'età della prima mestruazione diminuisce sempre di più, con conseguenze preoccupanti

Tre settimane prima del suo ottavo compleanno, a Josie sono venute le mestruazioni mentre era a scuola. Sua madre Magen si è fermata al supermercato a comprare degli assorbenti prima di andare a prendere la figlia. Ha trovato uno scaffale dedicato ai prodotti per mestruazioni adolescenziali che promettevano di «adattarsi ai fisici più minuti». Ricorda di essersi chiesta: come possono esistere prodotti del genere?

Magen era addolorata che la figlia di sette anni avesse il ciclo, ma non era del tutto sorpresa. Aveva iniziato a notare cambiamenti nell'odore della figlia quando aveva sei anni. A sette anni Josie aveva iniziato ad avere brufoli sul naso, a sbattere le porte e a dormire fino a tardi. L'estate tra la prima e la seconda elementare aveva cominciato a mettere su il seno. «È stato un trauma per entrambe», ammette Magen.

Magen ha mostrato a Josie come mettere l'assorbente sugli slip e poi ha chiamato il pediatra, pensando che le avrebbe consigliato degli esami ormonali. Invece, ricorda Josie, «mi ha detto "Sì, capita. È probabile che per un po' non sarà regolare ma è entrata nella pubertà a otto anni"».

Negli Stati Uniti l'età media del menarca, o della prima mestruazione, è di 12 anni, secondo gli ultimi dati del National Health and Nutrition Examination Survey dei Centers for Disease Control and Prevention [età simile a quella osservata in Italia, N.d.R.], rispetto ai 14 anni di età di un secolo fa e in anticipo di sei mesi rispetto a 20 o 30 anni fa. Ma la pubertà non inizia con le mestruazioni. Lo sviluppo delle ghiandole mammarie, o telarca, tende a iniziare prima, proprio com'è avvenuto con Josie. «Oggi osserviamo che il telarca avviene da 18 mesi a due anni prima rispetto a qualche decina di anni fa», conferma Frank Biro, che studia i problemi correlati alla maturità puberale presso il Cincinnati Children's Hospital Medical Center. La sua ricerca, pubblicata nel 2013 su «Pediatrics», collocava l'età media dello sviluppo mammario a 8,8 anni per le ragazze afroamericane, 9,3 anni per le ispaniche e a 9,7 anni per caucasiche e asiatico-americane. «L'età in cui si sviluppa il seno è scesa in modo evidente e quella del menarca si è ridotta. Entrambi i casi destano preoccupazione», dice.

Un falso mito sul menarca è che rappresenti l'inizio dell'ovulazione. Al contrario la maggior parte delle ragazze inizia a ovulare regolarmente anche due anni dopo la prima mestruazione, ed è per questo che all'inizio il flusso può essere leggero e irregolare. Il menarca è invece innescato da variazioni nei livelli di estrogeni. La spiegazione più plausibile dell'abbassamento

namento ma la capacità dell'utero di ispessire il suo rivestimento in vista dell'impianto, per poi disfarsi dell'endometrio quando non serve. «Un endometrio sano richiede un supporto metabolico costante; per il corpo femminile è meno dispendioso in termini energetici distruggerlo e ricostruirlo a ogni ciclo in modo da mantenerlo sempre pronto per l'impianto dell'embrione», spiega Strassmann. La circolazione del sangue umana sembra portare a un endometrio assai irrorato. «La nostra fisiologia non permette il riassorbimento, per cui la maggior parte del sangue è eliminata con le mestruazioni», prosegue. Il sanguinamento potrebbe quindi essere un effetto collaterale dell'evoluzione, più che un vantaggio.

Un mondo senza mestruazioni?

Se la perdita di sangue mestruale non porta a un chiaro beneficio per la salute o a un vantaggio evolutivo e se, storicamente, le mestruazioni non sono state poi così frequenti, allora perché nell'era post-pillola la donne continuano ad avere il ciclo? Risposta: non per tutte è così. A gennaio 2019, il Royal College of Obstetricians and Gynecologists di Londra ha pubblicato nuove linee guida che approvano l'uso ininterrotto della pillola per ridurre la frequenza delle mestruazioni o evitarle del tutto.

Sebbene questo riconoscimento formale sia nuovo, la pratica non lo è. La soppressione medica delle mestruazioni è nota da tempo a medici e donne stufe di crampi, sbalzi d'umore o fastidi del ciclo. Anche l'industria farmaceutica se n'è accorta: in qualità di prima ricercatrice ad aver misurato e quantificato la frequenza delle mestruazioni, a Strassmann è stato chiesto di presentare i suoi dati a case farmaceutiche che hanno proposto più versioni della pillola e di altre forme di contraccezione formulate per permettere alle donne di saltare più spesso il ciclo o di evitarlo del tutto.

Evitare questo calvario mensile significa non avere più un dolore invalidante, forti e prolungate emorragie, emicranie e altri sintomi che possono incidere negativamente sulla qualità di vita di una donna. Circa il 25 per cento delle donne e delle ragazze in età fertile che combattono contro altri tipi di dolore mestruale intenso possono essere più esposte ad altre forme patologiche di dolore cronico. «Sospettiamo che l'esperienza ciclica del dolore mestruale possa alterare il modo in cui alcune donne elaborano ogni forma di dolore», spiega Laura Payne, che dirige una ricerca sul dolore nell'ambito di un programma pediatrico alla David Geffen School of Medicine dell'Università della California a Los Angeles.

Per i tanti medici le cui pazienti presentano mestruazioni problematiche, «la pillola è quanto di più simile a una panacea per la salute femminile», sostiene Jonathan Schaffir, professore associato di ostetrica e ginecologia alla Ohio State University. Ma è davvero così? «La pillola non è una cura per questi problemi – dice Kissling – ma un modo per non doverli affrontare». Possono volerci anche più di dieci anni per diagnosticare l'endometriosi, per esempio, e in parte il motivo è che i medici prescrivono subito il rimedio alle adolescenti che lamentano forti crampi senza indagare su eventuali cause sottostanti, dice Jerilynn Prior, endocrinologa della University of British Columbia. E nei casi in cui una pillola può mascherare i sintomi, un'altra potrebbe acuirli. «Rischi di passare anni passando da una pillola a un'altra senza mai trovare sollievo», osserva Kissling, che ha pubblicato un articolo su come le donne finiscano per «curarsi tra loro», con tutto ciò che implica, sui forum on line, condividendo consigli e rimedi alternativi nati dalla frustrazione per il limitato repertorio dei loro medici.

Strassmann e molti altri medici sono scettici sugli effetti per la salute della sospensione farmacologica del ciclo, perché può esporre le donne a livelli ormonali più alti rispetto a quelli registrati in passato o anche oggi, se si regolarizza il ciclo con la pillola. «È vero che un periodo mestruale mensile non è necessario – dice – ma assumere più progestinici per saltare il ciclo non equiva-

dell'età del menarca e dello sviluppo del seno è che le ragazze tendono a pesare di più rispetto alla generazione passata. La percentuale più alta di grasso corporeo porta all'attivazione precoce dell'ipofisi, che produce l'ormone responsabile della pubertà.

Nello studio di Biro, l'indice di massa corporea (IMC) più alto era l'elemento predittivo più forte di sviluppo mammario precoce in tutti i gruppi etnici, sebbene la relazione fosse di tipo correlativo e non causale. «Quello che dobbiamo chiederci è, perché l'IMC è aumentato?», dice. «Con ogni probabilità tra le cause ci sono meno attività fisica e una dieta ipercalorica. Credo però che un ruolo chiave lo giochi anche l'esposizione costante agli interferenti endocrini». Questa classe di sostanze (che comprende tra gli altri ftalati e bisfenolo A) si trova in molti prodotti di consumo (tende della doccia, bottiglie di plastica, imbottiture dei divani) ed è stato dimostrato che imita gli estrogeni e altri ormoni naturalmente presenti nel corpo umano. Biro ipotizza che alcune di queste sostanze promuovano l'aumento di peso o contribuiscano alla pubertà precoce influenzando il modo in cui le cellule e il corpo regolano il metabolismo, che incide sulla produzione di estrogeni.

Attualmente sta seguendo la crescita e lo sviluppo di 379 ragazze dai sei anni in su per esaminare la relazione tra sviluppo della pubertà ed esposizioni ambientali. I traumi possono essere un'altra spiegazione: «Anche lo stress può alterare i livelli di estrogeni», aggiunge Biro.

Per Magen, la domanda più pressante non è perché Josie si sia sviluppata così presto, ma piuttosto che cosa significhi per la sua salute, immediata e a lungo termine. I dati che Biro sta raccogliendo mostrano che le ragazze con una pubertà precoce tendono a restare in questa fase più a lungo: passano più tempo in una «finestra di vulnerabilità» in cui il corpo è in una fase critica di sviluppo e le esposizioni ambientali e altre esperienze possono influire sulla salute futura. Quando si guarda al rischio di tumore al seno, per esempio, lo sviluppo fetale e l'infanzia sono una finestra, la pubertà un'altra. «Sappiamo che per ogni anno di ritardo del menarca il rischio di tumore al seno pre e post menopausa si riduce del 4-8 per cento», prosegue Biro. «In termini di popolazione è assai rilevante».

Altri ricercatori studiano come la pubertà precoce influisca sulla vita sociale ed emotiva delle ragazze. «Sappiamo che lo sviluppo riproduttivo precoce non corrisponde allo sviluppo cognitivo precoce», afferma Marcia Herman-Giddens, *adjunct professor* di salute materna e infantile alla Gillings School of Global Public Health dell'Università del North Carolina. «Come insegniamo ai bambini a gestire gli impulsi sessuali e altre realtà della pubertà? È evidente che queste ragazze dovranno affrontare le avance sessuali dei ragazzi più grandi o anche degli uomini molto tempo prima di sapersi orientare».

Magen cerca di capire come parlare a Josie di questi argomenti in modo appropriato per la sua età senza sovraccaricare la figlia già ansiosa. «Le ho dovuto dire che a un certo momento avrebbe provato interesse per le relazioni e il sesso e che quando sarebbe successo me lo doveva dire subito», ci racconta. «Ma sul serio dovrò far prendere contraccettivi a una dodicenne per essere sicuri che sia al sicuro?».

Il ciclo mestruale può essere monitorato anche aiutandosi con apposite app sviluppate per gli smartphone.

Tarik Kizilkaya/iStock

le a vivere come le nostre antenate di 500 o 1000 anni fa». La ricerca dimostra che assumere la pillola riduce il rischio di cancro alle ovaie e all'endometrio ma aumenta lievemente il rischio per tumore al seno, ictus e trombo.

Nel 2017 Strassmann e colleghi hanno pubblicato un articolo su «Evolution, Medicine, & Public Health» ripercorrendo come cambia l'esposizione agli ormoni sintetici in base al tipo di pillola assunta. «Sappiamo che le donne statunitensi hanno più cicli mestruali delle donne dogon perché si sviluppano prima e fanno meno figli, e sappiamo che questo è associato a un maggiore rischio di tumore al seno», spiega, osservando come la relazione sia probabilmente dovuta all'esposizione ormonale aggiuntiva associata alla maggior frequenza del ciclo. «Ma non sappiamo esattamente come questo rischio si concili con l'esposizione derivante dall'uso a lungo termine di pillole anticoncezionali». Dopo aver analizzato i dati da 12 studi e le informazioni contenute nei foglietti illustrativi delle pillole, il gruppo di Strassmann ha concluso che alcuni tipi di pillola espongono le donne a dosi quadruple di progestina (una forma sintetica di progesterone presente nella pillola) rispetto al progesterone naturalmente prodotto dal corpo durante il ciclo.

Nessuno sa per certo che cosa significherà a lungo termine l'esposizione agli ormoni sintetici per le donne che usano la pillola per sopprimere il ciclo indefinitamente. Questa lacuna cela preoccupazioni più ampie sulla nostra ignoranza in tema di mestruazioni. Se Rock e Pincus avessero iniziato i loro lavori con una conoscenza più approfondita sull'evoluzione e sullo scopo delle mestruazioni, che conseguenze ci sarebbero state per lo sviluppo della pillola? Oggi le donne avrebbero più opzioni, e più mirate, per gestire il dolore mestruale e i disturbi associati?

In quest'ultima iterazione del tabù mestruale, eliminare le mestruazioni invece di fare luce sulla loro complessità potrebbe avere conseguenze imprevedibili per la salute. «I dati in nostro possesso sulla pillola provengono da generazioni di donne che hanno seguito lo schema per cicli da 28 giorni e non l'hanno assunta tanto a lungo come invece avviene per le donne di oggi» dice Kissling. «Quello a cui stiamo assistendo», ovvero donne che usano la pillola per sopprimere il ciclo a lungo termine, «è il più grande esperimento medico non controllato sulle donne della storia». ■

PER APPROFONDIRE

The Biology of Menstruation in *Homo sapiens*: Total Lifetime Menses, Fecundity, and Nonsynchrony in a Natural-Fertility Population. Strassman B.I., in «Current Anthropology», Vol. 38, n. 1, pp 123-129, febbraio 1997.

Questo è il mio sangue. Thiébaut E., Einaudi, Torino, 2018.

Fotografia di Jamie Chung

IL FUTURO DELLA MEDICINA

Riproduzione sicura?

Morti da parto forse evitabili, basso uso di contraccettivi e disinformazione: in Italia la salute riproduttiva delle donne ha qualche problema

di Cristina Da Rold

uando ho dato alla luce mia figlia Olympia sono quasi morta. [...] È iniziato tutto con un'embolia polmonare, seguita dall'apertura della ferita del cesareo a causa della forte tosse. Sono stata operata di nuovo, e il dottore ha riscontrato un grosso ematoma nell'addome. Sono infinitamente grata di aver avuto la possibilità di essere assistita da medici e infermiere incredibili, in un ospedale dotato di attrezzature all'avanguardia. Altrimenti adesso non sarei qui."

IN BREVE

Un recente rapporto ha mostrato che in Italia la mortalità materna è più elevata rispetto a quanto si ritenesse in passato. E che molte di queste morti forse si sarebbero potute evitare se l'assistenza fosse stata più appropriata.

Quando si parla di salute riproduttiva delle donne, l'Italia ha anche un altro problema: registra percentuali di uso della contraccezione tra i più bassi del resto dei paesi dell'Europa occidentale, e la disinformazione è significativa fra le fasce di popolazione più giovane.

Nonostante ciò, le interruzioni volontarie di gravidanza sono in diminuzione. Restano però cruciali le questioni legate all'accesso alla contraccezione d'emergenza e alla gratuità del counselling anticoncezionale nei consultori e degli anticoncezionali stessi.

Cristina Da Rold è giornalista scientifica *freelance* e *data-journalist*, si occupa di salute ed epidemiologia. Dal 2015 è consulente per la comunicazione per l'Ufficio italiano dell'Organizzazione mondiale della Sanità.

È la testimonianza della statunitense Serena Williams, campionessa mondiale di tennis, che ha condiviso con UNICEF questa sua intima e drammatica esperienza. Non si parla molto di questo tema, ma non tutte le mamme sono fortunate come Serena, e spesso si tratta di situazioni che potrebbero essere affrontate per tempo, anche qui da noi.

Oggi in Italia le morti materne sono il 60 per cento in più di quanto si ritenesse in passato. Lo afferma il primo rapporto nazionale sulla mortalità materna presentato a marzo 2019, in occasione del convegno dell'Italian Obstetric Surveillance System (ItOSS), coordinato dal Reparto salute della donna e dell'età evolutiva del Centro nazionale prevenzione delle malattie e promozione della salute dell'Istituto superiore di Sanità (ISS). Il rapporto contiene i dati ottenuti in dieci anni di rilevamenti del sistema di sorveglianza della mortalità materna (MMR) nelle regioni che hanno aderito al progetto sviluppatosi in due fasi – la prima dal 2006 al 2012, la seconda dal 2013 al 2017 – usando due approcci: uno retrospettivo e uno prospettico (*si veda l'infografica a p. 44*).

Grazie al progetto è stato possibile per la prima volta stimare la dimensione del fenomeno e descrivere le cause della mortalità materna in Italia. Sono stati identificati 277 decessi materni, pari a 9,18 morti materne per 100.000 nati vivi fra il 2008 e il 2012, il 60 per cento in più di quanto emerge dall'analisi dei soli certificati di morte, che ha prodotto una stima dell'MMR pari a 3,5 decessi ogni 100.000 nati vivi. Si parla di morte materna se il decesso avviene durante la gravidanza o entro 42 giorni dal suo termine, per qualsiasi causa legata o aggravata dalla gravidanza, ma non per cause accidentali o incidentali.

Il primo rapporto sul tema ha mostrato che in Italia le morti materne sono molte più di quanto ritenuto

Dal 2013 al 2017 sono stati registrati 106 decessi, di cui 58 dovuti a cause ostetriche (si parla in questo caso di morti materne dirette) e 39 a condizioni preesistenti aggravate dalla gravidanza (morti indirette). Secondo il rapporto, forse 41 di queste 106 morti si sarebbero potute evitare se l'assistenza fosse stata più appropriata. Le cause specifiche dei decessi sono state attribuite per 90 casi perché negli altri 16 mancavano informazioni da cartella clinica o da autopsia, che ne permettessero la classificazione.

Si tratta di numeri che ci sembrano insostenibili, ma che sono esigui rispetto a quanto accade nel resto del mondo. Secondo i dati più recenti dell'Organizzazione mondiale della Sanità (OMS), ogni giorno globalmente 830 donne muoiono per le complicazioni legate alla gravidanza o al parto: solo nel 2015 si sono registrati 303.000 decessi. Più si è giovani, meno si è supportate, maggiore è il pericolo. Nei paesi sviluppati, una ragazza di 15 anni su 4900 rischia di morire per complicanze legate al parto, contro 1 su 180 nei paesi in via di sviluppo e 1 su 54 nei paesi più poveri.

I giovani e la contraccezione

La salute riproduttiva, però, riguarda la donna ben prima di un eventuale concepimento. Prendersi cura della propria salute e conoscere il proprio corpo significa fare prevenzione, a partire dalla possibilità di gravidanze indesiderate. Il nostro paese registra percentuali di uso della contraccezione più bassi del resto dei paesi dell'Europa occidentale, ma non solo: alcuni dati indicano che la disinformazione è ancora significativa fra le fasce di popolazione più giovane. Un sondaggio del Censis pubblicato nel 2017 evidenziava che il 18,7 per cento dei ragazzi e delle ragazze di età compresa fra i 12 e i 14 anni non aveva sentito parlare di malattie sessualmente trasmesse. Eppure, i ragazzi iniziano l'attività sessuale mediamente a 16 anni e ad avere i primi rapporti completi a 17.

Secondo il progetto Studio nazionale fertilità coordinato dall'ISS pubblicato quest'anno e che ha riguardato 16.000 studenti tra i 14 e i 18 anni di età, un adolescente sessualmente attivo su dieci non usa metodi contraccettivi, nemmeno il coito interrotto. Il 29 per cento delle ragazze al primo rapporto sessuale ha usato il coito interrotto e il 77 per cento il preservativo. Il 13 per cento ha optato per dispositivi ormonali, pillola, anello, cerotto (la somma delle percentuali dà come risultato un valore maggiore di 100, segno che alcune hanno scelto una combinazione di più metodi). L'81 per cento degli adolescenti intervistati sa che la donna può rimanere incinta già nel primo rapporto sessuale, ma solo la metà sa che «per una donna è più probabile rimanere incinta se ha rapporti sessuali nei giorni a metà tra una mestruazione e l'altra».

«Si tratta di sondaggi condotti per definizione su campioni di adolescenti», precisa Costantino Di Carlo, professore di ginecologia all'Università di Catanzaro e membro del direttivo della Società italiana contraccezione. «In Italia il fenomeno delle gravidanze fra adolescenti non è molto diffuso rispetto ad altri paesi europei, né abbiamo riscontrato un numero significativo di interruzioni volontarie di gravidanza fra le giovanissime», specifica Di Carlo. «Le ultime stime dell'OMS parlano di 5 nati ogni 1000 donne fra i 15 e i 19 anni. Per fare un paragone, fra le britanniche il tasso è di 14 nati ogni 1000 ragazze, in Francia 9,2, in Germania 7,8 e in Spagna 7,7 nati per 1000 ragazze», spiega. Secondo lo Studio nazionale fertilità, aggiunge il ginecologo, circa 1 adolescente su 3 ha dichiarato di aver avuto rapporti sessuali completi e con un uso abbastanza diffuso del profilattico.

In Italia ne facciamo poca?

Lo stesso «paradosso» si osserva anche fra la popolazione adulta in età fertile. I dati più recenti derivano dall'indagine *Condizioni di salute e ricorso ai servizi sanitari* condotta dall'ISTAT nel 2013 su un campione di donne dai 15 ai 49 anni di età. Considerando anche il coito interrotto, non annoverato fra i «metodi contraccettivi moderni», per usare un'espressione tecnica dell'OMS, nell'anno precedente all'intervista 73 donne su 100 hanno usato almeno un metodo contraccettivo. Il 19 per cento di queste 73 donne ha usato il coito interrotto, il 25 per cento la pillola anticoncezionale, il 39 per cento almeno una volta il preservativo e il 22 per cento regolarmente il preservativo.

Negli ultimi vent'anni in realtà la percentuale di chi non usa alcun metodo anticoncezionale non è cambiata di molto. È aumentato leggermente l'uso della pillola (+4,5 per cento dal 1996 al 2013), diminuisce il ricorso alla spirale, mentre resta sostanzialmente stabile l'uso del preservativo a ogni rapporto. Qualcosa si muove an-

che in Italia dunque, ma con un ritardo di almeno 45 anni rispetto a molti paesi europei. I due restanti metodi ormonali (anello e cerotto) considerati insieme sono scelti da appena il 3,9 per cento delle donne italiane, il diaframma sfiora l'1 per cento.

La spirale (o IUD, da *intrauterine device*, o IUC, da *intrauterine contraception*) è un dispositivo di plastica a forma di T che contiene ormoni sintetici o rame, ed è inserita nell'utero per tre o cinque anni impedendo la gravidanza. Dai dati fruibili in Italia risulta che sia scelta solo dal 4,5 per cento delle donne. «In realtà non si sa con precisione quante spirali sono inserite perché non sono farmaci ma dispositivi sanitari, e sono anche piuttosto costosi rispetto ad altri paesi europei, dove l'inserimento può essere effettuato pure da ostetriche», spiega Marina Toschi, per quarant'anni ginecologa dei Consultori della ASL di Perugia e membro del direttivo della Società europea della contraccezione e salute riproduttiva.

Sappiamo solo che sono assai meno di quante potrebbero essere, dato che il metodo è sicuro ed efficace: «In molti consultori non si propongono le IUD per questioni legate alla medicina difensiva, perché nella nostra legislazione l'inserimento in cavità uterina è considerato come un piccolo intervento. I rischi medici riguardano solo l'inserimento, eseguito generalmente nel corso della mestruazione, con 1 caso su 1000 introduzioni di rottura dell'utero durante l'inserimento. Lo specialista quindi deve avere un'assicurazione aggiuntiva rispetto alla pratica ambulatoriale», racconta Toschi. Inoltre la ASL dovrebbe aver messo a punto la gestione dell'emergenza «come quella delle lipotimie vagali (mancamenti) post inserimento, altrimenti ci potrebbero essere problemi medico legali per la struttura anche per questo intervento ambulatoriale minore». Ci sono poi questioni di carattere pratico: l'inserimento della spirale richiede una piccola strumentazione di ferri chirurgici, e quindi la loro sterilizzazione: molti consultori non sono attrezzati per questo.

Gli italiani ricorrono meno ai contraccettivi rispetto al resto dell'Europa, però nascite e aborti volontari diminuiscono

Infine, l'1,2 per cento delle donne in età fertile ricorre alla sterilizzazione, che però ha l'effetto collaterale spesso non raccontato di ridurre fortemente la capacità di sentire l'orgasmo. «Ma in Italia non è facile avere accesso alla sterilizzazione, sia per gli uomini sia per le donne. Molti ospedali rifiutano di chiudere le tube anche a donne dopo due cesarei. Per gli uomini la chiusura dei dotti deferenti è a pagamento, e non è facile trovare ospedali pubblici che la pratichino», racconta Toschi.

I dati appena citati derivano ancora una volta da sondaggi su campioni significativi, ma non sono certo una panoramica esaustiva. Interessante è porre la questione in termini di spesa sanitaria. L'ultimo rapporto OsMed dell'Agenzia italiana del farmaco (AIFA) riporta che nel 2017 i contraccettivi orali sono al secondo posto, con una spesa di 256 milioni di euro che denota un consumo stabile negli ultimi quattro anni. Le associazioni fisse estroprogestiniche rappresentano quasi l'80 per cento delle dosi della categoria. Importanti aumenti di consumo si evidenziano per i progestinici (+62 per cento) e per i contraccettivi di emergenza come la pillola del giorno dopo (+13,5).

La scienza dei contraccettivi ormonali

Sono molti i luoghi comuni riguardo alla pillola anticoncezionale in cui ci si imbatte navigando su Internet, specie nei forum: il presunto legame con il rischio di tromboembolismo, di cancro e la paventata diminuzione della fertilità delle donne. Riguardo alla possibilità di tromboembolismo venoso, sia l'Agenzia europea per i medicinali che AIFA hanno recentemente confermato che il rischio di trombosi venosa è basso: circa 10 volte meno che in gravidanza. Le complicanze tromboemboliche sono dovute principalmente al dosaggio dell'estrogeno e al tipo di progestinico, dunque la pillola è controindicata solo per le donne con storia familiare di trombosi o che soffrono di malattie di coagulazione. «La letteratura scientifica, che è molto ampia oggi, ci dice che i contraccettivi ormonali sono assolutamente sicuri – spiega Di Carlo – perché solo donne predisposte geneticamente a questo problema sono davvero a rischio. Nel caso in cui una donna presentasse una storia familiare di tromboembolia, ogni ginecologo le può consigliare il metodo contraccettivo a lei più indicato».

Un altro aspetto spesso bistrattato è il presunto legame fra assunzione di contraccettivi ormonali e l'insorgenza del cancro a mammella, utero e ovaie. «Si tratta di paure non giustificate, perché anche gli studi indipendenti meno "positivi" non hanno mai rilevato correlazioni significative in termini di aumento di rischio assoluto», continua Di Carlo.

Un ampio studio danese pubblicato nel 2017 sul «New England Journal of Medicine» ha seguito per dieci anni 1,8 milioni di donne che hanno scelto la pillola contraccettiva, rilevando che il rischio relativo di cancro al seno era più elevato tra le donne che avevano usato contraccettivi ormonali, anche in modo discontinuo, rispetto alle donne che non ne hanno mai fatto uso, ma che l'aumento in termini di rischio assoluto era trascurabile. Questi dati confermano quelli di un precedente studio che aveva esaminato un campione di donne che hanno preso la pillola per cinque anni, rilevando un rischio relativo pari a 1,2 di sviluppare tumore al seno contro un rischio pari a 1 fra donne che non usavano contraccettivi ormonali.

«Si tratta di 7-8 casi in più su 100.000 donne. Non dimentichiamo che qualsiasi donna ha un certo rischio nel corso della propria vita di sviluppare tumore al seno, ma va correlato con età e familiarità. Diversi studi, al contrario, hanno rilevato che prendere la pillola protegge addirittura dal cancro», conclude Di Carlo. Una ricerca effettuata dall'Università di Oxford e pubblicata nel 2017 sull'«American Journal of Obstetrics & Gynecology», ha coinvolto 46.000 donne seguite per 44 anni, concludendo che la riduzione nel rischio di sviluppare cancro al colon e alle ovaie era evidente in chi assumeva contraccettivi ormonali, un vantaggio presente anche negli anni successivi all'interruzione dell'assunzione.

Sempre meno interruzioni volontarie di gravidanza

Il dato di fatto è che, nonostante gli italiani usino meno i metodi contraccettivi moderni (esclusi quindi coito interrotto e misurazione della temperatura basale) rispetto al resto d'Europa, negli ultimi anni sono diminuiti sia gli aborti volontari sia le nascite. Registriamo una riduzione del 32 per cento di interruzioni volontarie di gravidanza (IVG) rispetto al 2004, che riguarda tutte le classi di età, specialmente le donne più giovani, fra i 15 e i 24 anni, oltre a una riduzione percentuale e assoluta delle nascite nello stesso arco di tempo.

In Italia, grazie alla Legge 194 del 1978, la donna può richiedere l'IVG entro i primi 90 giorni di gestazione per motivi di salute, economici, sociali o familiari. I dati del Ministero della salute parlano di 80.497 IVG praticate nel 2017 (il 5 per cento in più sul 2016) con-

fermando l'andamento di progressiva diminuzione: nel 1983 questi interventi erano circa 235.000. I dati sono quelli registrati dal Sistema di sorveglianza epidemiologica delle IVG (attivo nel nostro paese dal 1980), che vede impegnati Istituto superiore di Sanità, Ministero della salute, ISTAT, Regioni e le due Province autonome di Trento e Bolzano. Scopriamo così che il tasso di abortività, cioè il numero di IVG su 1000 donne fra i 15 e i 49 anni residenti in Italia è fra i più bassi tra quelli dei paesi occidentali e nel 2017 risulta pari a 6,2 per 1000 (–3,3 per cento rispetto al 2016).

Una IVG può essere eseguita con il metodo farmacologico o con quello chirurgico, in entrambi i casi in regime di ricovero ordinario. A gennaio 2019 il Ministero della Salute ha pubblicato i dati definitivi sulle IVG nel 2017, dai quali è emerso che la tecnica più usata anche nel 2017 è l'isterosuzione, che ha riguardato la metà esatta dei casi. Si tratta dell'aspirazione dell'embrione mediante l'introduzione nell'utero di una cannula collegata a un aspiratore (metodo Karman). È in lieve aumento comunque l'uso dell'aborto farmacologico, che si basa sull'assunzione di due principi attivi diversi, il mifepristone (la pillola nota come RU486) e poi una prostaglandina, a distanza di 48 ore l'uno dall'altro. Il primo farmaco interagisce con i recettori del progesterone, che sono necessari per il mantenimento della gravidanza, causandone la cessazione, mentre il secondo farmaco ne determina l'espulsione.

Ma in Italia, a differenza della maggior parte dei paesi europei, solo il 16 per cento delle IVG avviene con questi farmaci. «In Francia e in Belgio sono i medici di famiglia che, dopo un breve corso e in contatto con gli ospedali, consegnano alla donna le due compresse spiegandole come assumerle. In Svezia sono le ostetriche che dispensano questo tipo di IVG. L'Italia è l'unico paese dove è obbligatorio il ricovero di tre giorni per assumere le due compresse e dove si possono usare i farmaci solo entro le sette settimane, mentre nel resto d'Europa si usano sino a nove settimane, come è scritto nelle istruzioni allegate al farmaco», racconta Toschi. «Queste ragioni sono alla base del basso ricorso a questa tecnica da parte delle donne. Inoltre, la certificazione non d'urgenza per la IVG rilasciata dal medico, obbliga a sette giorni di attesa e di riflessione. Quindi sono poche le donne che riescono a sfruttare questa strettissima finestra di 15 giorni a partire dalla mancata mestruazione, a trovare un medico che rilasci il certificato e un ospedale che esegua l'IVG medica, considerando anche i sette giorni obbligatori di riflessione».

L'obiezione di coscienza dei ginecologi è ancora un tema cruciale per il diritto all'aborto sancito dalla legge

In Italia l'obiezione di coscienza rimane un tema cruciale. Nonostante le leggi stabiliscano un diritto alla contraccezione e al ricorso all'IVG per le donne, c'è ancora un numero elevato di operatori sanitari che esercitano questo diritto. È obiettore il 68,4 per cento dei ginecologi italiani e il 45,6 per cento degli anestesisti. «Il punto però non è che i ginecologi non obiettori non sono abbastanza – precisa Di Carlo – perché il numero di IVG non è così elevato. Il problema è che non tutti i centri hanno almeno un ginecologo non obiettore, provocando notevoli problemi organizzativi di gestione dei flussi».

La contraccezione d'emergenza

Un aspetto importante da sottolineare è che molti esperti ritengono che l'introduzione della contraccezione d'emergenza in vendita in farmacia sia connessa con la riduzione degli aborti volontari. La stessa ex ministra della salute Giulia Grillo, nelle conclusioni alla già citata relazione di fine 2018 ha precisato che «sulla riduzione delle IVG molto probabilmente ha inciso anche l'aumento dell'uso della contraccezione d'emergenza [...] che non ha più l'obbligo di prescrizione medica per le maggiorenni, e quindi richiede una maggiore informazione alle donne per evitarne un uso inappropriato».

Stiamo parlando di due possibilità diverse: la famosa «pillola del giorno dopo», a base di levonorgestrel, da assumere entro 72 ore dal rapporto sessuale a rischio; e della pillola, dei «cinque giorni dopo», a base di ulipristal acetato, da assumersi entro 120 ore da un rapporto sessuale non protetto o dal fallimento di altro metodo contraccettivo. Entrambe hanno tanta più efficacia quanto prima sono assunte.

Il diritto di richiedere la pillola del giorno dopo e quella dei cinque giorni dopo senza bisogno di ricetta medica per le donne maggiorenni e con ricetta medica non ripetibile per le minorenni è garantito da due determine AIFA: una del 21 aprile 2015 e l'altra del 1° febbraio 2016, liberamente scaricabili da Internet e che possono essere presentate nel caso in cui il farmacista si rifiuti di dispensare il contraccettivo d'emergenza senza prescrizione, o il medicinale non sia presente in farmacia. Il fatto che il governo non abbia inserito i famaci per la contraccezione d'emergenza fra quelli essenziali fa sì che una farmacia possa non avere l'obbligo di tenere confezioni di questi farmaci nel proprio magazzino.

L'importanza del counselling (gratuito)

I numeri sull'uso della contraccezione non dicono tutto: non danno per esempio conto di quanto sia consapevole la scelta delle donne per l'uno o l'altro contraccettivo. Sono ancora molte le informazioni false che circolano anche su come evitare una gravidanza indesiderata: la convinzione che non si possa rimanere incinta nel periodo dell'allattamento, che alcune posizioni durante l'amplesso facilitino l'espulsione degli spermatozoi o che alcune bevande, se usate come lavande vaginali, agiscano come spermicidi. «Da ginecologa continuo a entrare in contatto con donne che non conoscono per nulla il proprio corpo», prosegue Toschi. «Diverse donne, anche dopo aver avuto un figlio, anche se laureate, non sanno disegnare i propri genitali esterni, e quando propongo lo specchio durante le visite, la maggior parte lo rifiuta perché non vuole vedere le proprie parti intime», racconta. È evidente che per queste donne sarà difficile avvicinarsi a contraccettivi come l'anello.

Uno dei dibattiti più accesi oggi in Italia su questo fronte è quello della gratuità del *counselling* anticoncezionale nei consultori e degli anticoncezionali stessi. «Le leggi non mancano, dalla Legge 405 del 1975 sull'istituzione dei consultori familiari, alla Legge 194 del 1978 sull'interruzione volontaria di gravidanza e la tutele della gravidanza, che prevedevano equità e universalismo, e quindi gratuità. Eppure – continua Toschi – l'articolo 4 della Legge 405, che prevede che l'onere delle prescrizioni di prodotti farmaceutici spetti all'ente o al servizio cui compete l'assistenza sanitaria, non viene applicato in quasi tutte le Regioni italiane. Questo nonostante l'Organizzazione mondiale della Sanità abbia incluso nella lista dei farmaci essenziali, quindi accessibili a tutte e a tutti, la contraccezione orale di seconda generazione, i contraccettivi di solo progestinico, i preservativi, le spirali a base di levogestrel e il diaframma. Anzi: da luglio 2016 nessuna pillola estroprogestini-

Prezzi non modici. In Italia i prezzi dei contraccettivi più prescritti sono i più alti d'Europa, motivo per cui alcune regioni hanno iniziato ad attivarsi per fornirli gratuitamente insieme a servizi di consulenza per gli anticoncezionali nei consultori.

ca è gratuita, e i prezzi dei contraccettivi più prescritti, sono i più alti in Europa.

Le pillole in commercio hanno un costo medio mensile di 17 euro, l'anello vaginale di 19 euro, una confezione di preservativi costa circa 8 euro. Una spirale della durata di cinque anni costa a un singolo intorno ai 240 euro, a cui si aggiungono i costi dell'introduzione, se avviene privatamente. All'ospedale una spirale al progestinico costa 110 euro e al rame attorno ai 30 euro. Per questo in Italia sono nati la Rete nazionale Molto più di 194, il Comitato per la contraccezione gratuita e consapevole e la Rete Pro Choice, che chiede pillole e preservativi gratuiti per tutte le donne italiane.

Al momento qualche Regione italiana ha iniziato ad attivarsi per fornire gratuitamente contraccettivi e counselling. La prima a partire è stata la Puglia, con una delibera su distribuzione di condom a ragazzi con meno di 24 anni, a donne straniere o indigenti. Nel 2017 ha iniziato l'Emilia Romagna, che offre gratis ai residenti con meno di 26 anni e alle donne disoccupate o in mobilità spirali, contraccettivi ormonali e preservativi. Nel 2018 è stata la volta del Piemonte, che offre contraccezione gratuita alle donne sotto i 26 anni di età e alle disoccupate fra i 26 e i 45 anni. Anche Toscana e Marche hanno fatto scelte simili. Sempre nel 2018, il Lazio ha firmato una determina per assicurare la contraccezione d'emergenza gratuita.

Il futuro della contraccezione

La ricerca nel campo della contraccezione è molto attiva, prevalentemente nell'ottica di sviluppare formulazioni o modalità di erogazione più semplici degli ormoni sintetici già in commercio. Si parla da tempo, per esempio, della possibilità di progestinici autoiniettabili di lunga durata. In base agli studi effettuati, l'efficacia sembra buona, ma ci sono ancora diversi effetti collaterali, primo fra tutti l'amenorrea, ovvero l'assenza del ciclo mestruale, osservato in circa un terzo delle donne. Si parla anche di microchip suttocute della grandezza di un'unghia, che rilascino estroprogestinici con un telecomando esterno oppure di spugnette vaginali che oltre a bloccare fisicamente gli spermatozoi riescano a proteggere dal virus HIV contenuto nello sperma, rilasciando sostanze antivirali.

Infine, da oltre vent'anni è in fase di studio un contraccettivo orale maschile che bloccherebbe la produzione di spermatozoi agendo a livello ormonale. Il condizionale è d'obbligo, perché al momento i test eseguiti hanno riguardato la sicurezza del farmaco, e sembrano promettenti, anche se l'efficacia rispetto ai metodi già in commercio deve ancora essere valutata.

«In ogni caso – conclude Toschi - il futuro della contraccezione dovrà passare prima di tutto per un aumento della qualità dell'informazione per le donne e per gli uomini, per fare in modo che le loro scelte, qualsiasi esse siano, siano davvero consapevoli di quello che è meglio nella propria specifica situazione». ■

PER APPROFONDIRE

Sorveglianza della mortalità materna. Italian Obstetric Surveillance System (ItOSS), 2019. **https://www.epicentro.iss.it/itoss/pdf/ItOSS.pdf.**

Condizioni di salute e ricorso ai servizi sanitari. ISTAT, 2013. **https://www.istat.it/it/archivio/5471.**

Studio nazionale fertilità. Istituto superiore di Sanità, 2019. **http://www.salute.gov.it/imgs/C_17_pubblicazioni_2823_allegato.pdf.**

Per le statistiche sulla contraccezione in Europa consultare il sito web: **https://www.contraceptioninfo.eu.**

Una mortalità inaspettata

In Italia i decessi da parto sono più elevati di quanto ritenuto in passato

Testi di Cristina Da Rold, grafica di Valentina D'Efilippo

Le morti materne in Italia sono il 60 per cento in più di quanto si ritenesse finora. Lo afferma il primo rapporto nazionale sulla mortalità materna presentato a marzo 2019, in occasione del convegno dell'Italian Obstetric Surveillance System (ItOSS), coordinato dal Reparto salute della donna e dell'età evolutiva del Centro nazionale prevenzione delle malattie e promozione della salute dell'Istituto superiore di Sanità.

Il rapporto stima per la prima volta la dimensione reale del fenomeno con i dati frutto di dieci anni di rilevamenti del sistema di sorveglianza della mortalità materna (MMR) in alcune regioni – una prima fase dal 2006 al 2012 e una seconda fase dal 2013 al 2017 – usando due approcci: uno retrospettivo e uno prospettico. Sono stati selezionati 277 decessi materni, pari a 9,18 morti materne per 100.000 nati vivi fra il 2008 e il 2012, il 60 per cento in più di quanto emerge dall'analisi dei soli certificati di morte, che aveva prodotto una stima dell'MMR pari a 3,5 decessi ogni 100.000 nati vivi.

Si parla di morte materna se il decesso avviene durante la gravidanza o entro 42 giorni dal suo termine, per qualsiasi causa legata o aggravata dalla gravidanza, ma non per cause accidentali o incidentali. Dal 2013 al 2017 sono avvenute 106 morti: 58 sono dovute a cause ostetriche (si parla in questo caso di morti materne dirette), e 39 a condizioni preesistenti aggravate dalla gravidanza (si parla in questo caso di morti indirette). Secondo il rapporto, 41 di queste 106 morti avrebbero forse potuto essere evitate se l'assistenza fosse stata più appropriata. Le cause specifiche delle morti sono state attribuite solo per 90 casi, perché negli altri 16 mancano informazioni, da cartella clinica o da autopsia, che ne permettano la classificazione.

LA MORTALITÀ MATERNA NELLE REGIONI

Fino al 2017 il Sistema di sorveglianza ha raccolto dati completi e affidabili sulla mortalità materna in dieci Regioni italiane (Piemonte, Lombardia, Friuli Venezia Giulia, Emilia-Romagna, Toscana, Lazio, Campania, Puglia, Sicilia e Sardegna) che coprivano il 77 per cento dei nati in Italia e nel luglio 2018 si è aggiunto il Veneto. Da gennaio 2019 sono entrate a far parte della sorveglianza anche le Regioni Marche e Calabria, portando la copertura al 91 per cento dei nati in Italia.

Mortalità materna per 100.000 nati vivi

Morte materna: morte di una donna durante la gravidanza o entro 42 giorni dal suo termine, indipendentemente dalla durata e dalla sede della gravidanza, per qualsiasi causa legata o aggravata dalla gravidanza o dal suo management, ma non per cause accidentali o incidentali.

Mortalità materna diretta per 100.000 nati vivi

Morte materna diretta: morte causata da complicazioni ostetriche della gravidanza, parto e puerperio, da interventi, omissioni, trattamenti non corretti o da una catena di eventi che possono risultare da ognuna delle cause precedenti.

Mortalità materna per 100.000 nati vivi	Regione	Mortalità materna diretta per 100.000 nati vivi
12,68	Lazio	5,28
12,32	Campania	7,0
11,77	Sicilia	6,18
9,18	**TOTALE**	**4,94**
8,64	Sardegna	6,48
8,56	Puglia	6,33
7,7	Emilia-Romagna	3,5
7,14	Lombardia	4,46
7,08	Piemonte	2,98
6,66	Toscana	3,11
4,17	Friuli VG	1,39

Sorveglianza della mortalità materna, Italian Obstetric Surveillance System (ItOSS), 2019 *(mortalità materna regioni italiane e cause morti)*

A CONFRONTO CON GLI ALTRI PAESI

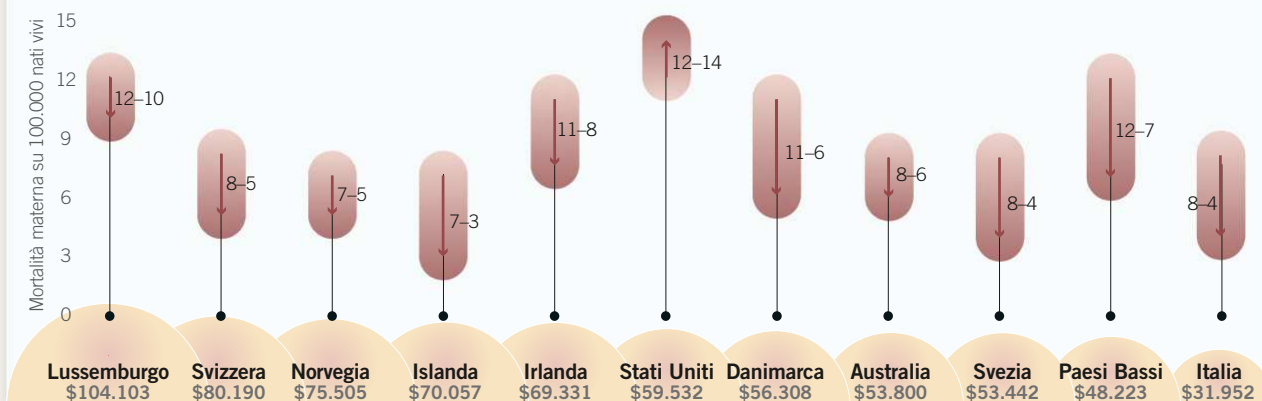
L'Italia mostra un numero di morti materne per 100.000 nati vivi più basso di molti altri paesi sviluppati. Secondo i più recenti dati dell'Organizzazione mondiale della Sanità (OMS), 830 donne muoiono ogni giorno nel mondo per le complicazioni legate a gravidanza o parto: nel 2015 si sono registrati 303.000 decessi. Più si è giovani e meno si è supportate, maggiore è il pericolo. Nei paesi sviluppati 1 giovane di 15 anni su 4900 rischia di morire per complicanze legate al parto, contro 1 su 180 nei paesi in via di sviluppo e 1 su 54 nei paesi più poveri.

Mortalità materna per 100.000 nati vivi (OMS)

1990–2015

Paese
PIL pro capite (in dollari USA)

Mortalità materna su 100.000 nati vivi

Paese	PIL pro capite	Mortalità materna 1990–2015
Lussemburgo	$104.103	12–10
Svizzera	$80.190	8–5
Norvegia	$75.505	7–5
Islanda	$70.057	7–3
Irlanda	$69.331	11–8
Stati Uniti	$59.532	12–14
Danimarca	$56.308	11–6
Australia	$53.800	8–6
Svezia	$53.442	8–4
Paesi Bassi	$48.223	12–7
Italia	$31.952	8–4

LE CAUSE DELLA MORTALITÀ

Su 106 morti avvenute dal 2013 al 2017 in Italia, 58 sono state dovute a cause ostetriche (si parla in questo caso di morti materne dirette), e 39 a condizioni preesistenti aggravate dalla gravidanza (si parla in questo caso di morti indirette).

Ogni linea rappresenta una morte materna avvenuta tra il 2013 e il 2017

CAUSA DI MORTE MATERNA DIRETTA (58)

- Emorragia ostetrica (22)
- Sepsi (11)
- Disordini ipertensivi (9)
- Embolia di liquido amniotico (6)
- Tromboembolia (4)
- Emorragia cerebrale (2)
- In attesa di autopsia (2)
- Complicanze anestesiologiche (1)
- Non definibile (1)

CAUSA DI MORTE MATERNA INDIRETTA (39)

- Patologia cardiovascolare (9)
- Sepsi (9)
- Emoperitoneo spontaneo (7)
- Neoplasie (5)
- Malattie infettive (3)
- Suicidio (3)
- Emorragia cerebrale (2)
- In attesa di autopsia (1)

Causa sconosciuta (9)

Morte evitabile

41 di queste 106 morti sarebbero potute essere evitate con un'assistenza più appropriata.
In 16 casi le informazioni disponibili sono state giudicate non esaurienti per esprimere – in occasione delle indagini confidenziali – un parere certo in termini di evitabilità.

- Inevitabile con assistenza appropriata (34)
- Inevitabile con assistenza migliorabile (15)
- Evitabile con assistenza appropriata (41)
- Dati non esaurienti (16)

Archivio dati del Global health observatory, Organizzazione mondiale della Sanità (*dati MMR dell'OMS*); Banca mondiale (*prodotto interno lordo pro capite*)

Contraccettivi? Nì, grazie

Il nostro paese non solo registra percentuali di uso della contraccezione più bassi del resto dei paesi dell'Europa Occidentale, ma alcuni sondaggi suggeriscono che livelli di disinformazione sono ancora significativi fra le fasce di popolazione più giovane. Un sondaggio condotto dal Censis e pubblicato nel 2017 evidenziava che il 18,7 per cento dei ragazzi di età compresa fra i 12 e i 14 anni, non aveva mai sentito parlare di malattie sessualmente trasmesse.

Come riporta lo Studio nazionale fertilità effettuato dall'Istituto superiore di sanità su 16.000 studenti dai 14 ai 18 anni e reso noto nel 2019, un adolescente sessualmente attivo su dieci non usa alcun metodo contraccettivo, nemmeno il coito interrotto. Il 29 per cento delle ragazze al primo rapporto sessuale ha usato il coito interrotto e il 77 per cento il preservativo. Il 13 per cento ha optato per dispositivi ormonali, pillola, anello, cerotto (la somma delle percentuali dà come risultato un valore maggiore di 100, segno che alcune hanno optato per la combinazione di più metodi). L'81 per cento degli adolescenti intervistati sa che la donna può rimanere incinta già nel primo rapporto sessuale, ma solo la metà sa che per «una donna è più probabile rimanere incinta se ha rapporti sessuali nei giorni a metà tra una mestruazione e l'altra».

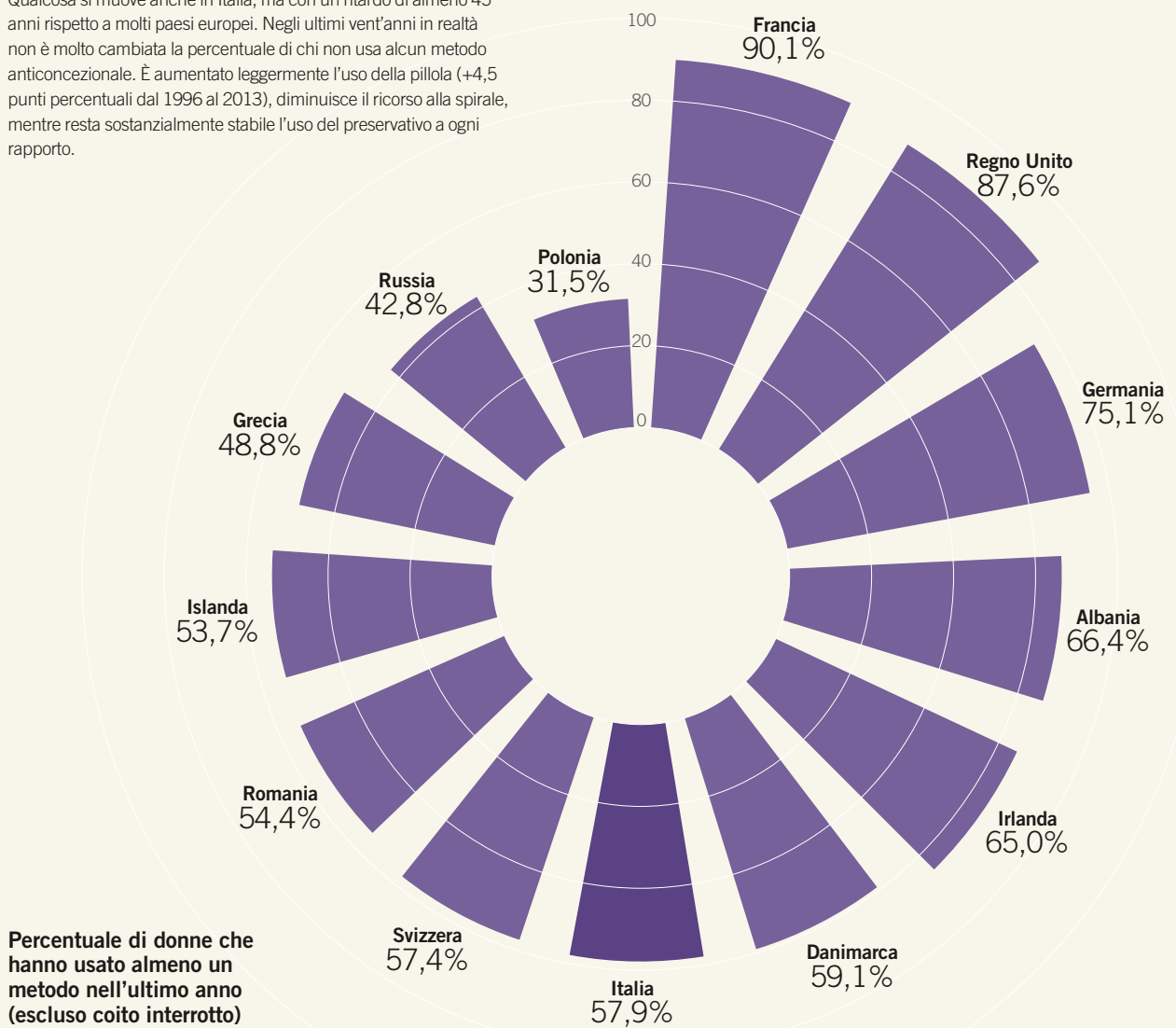
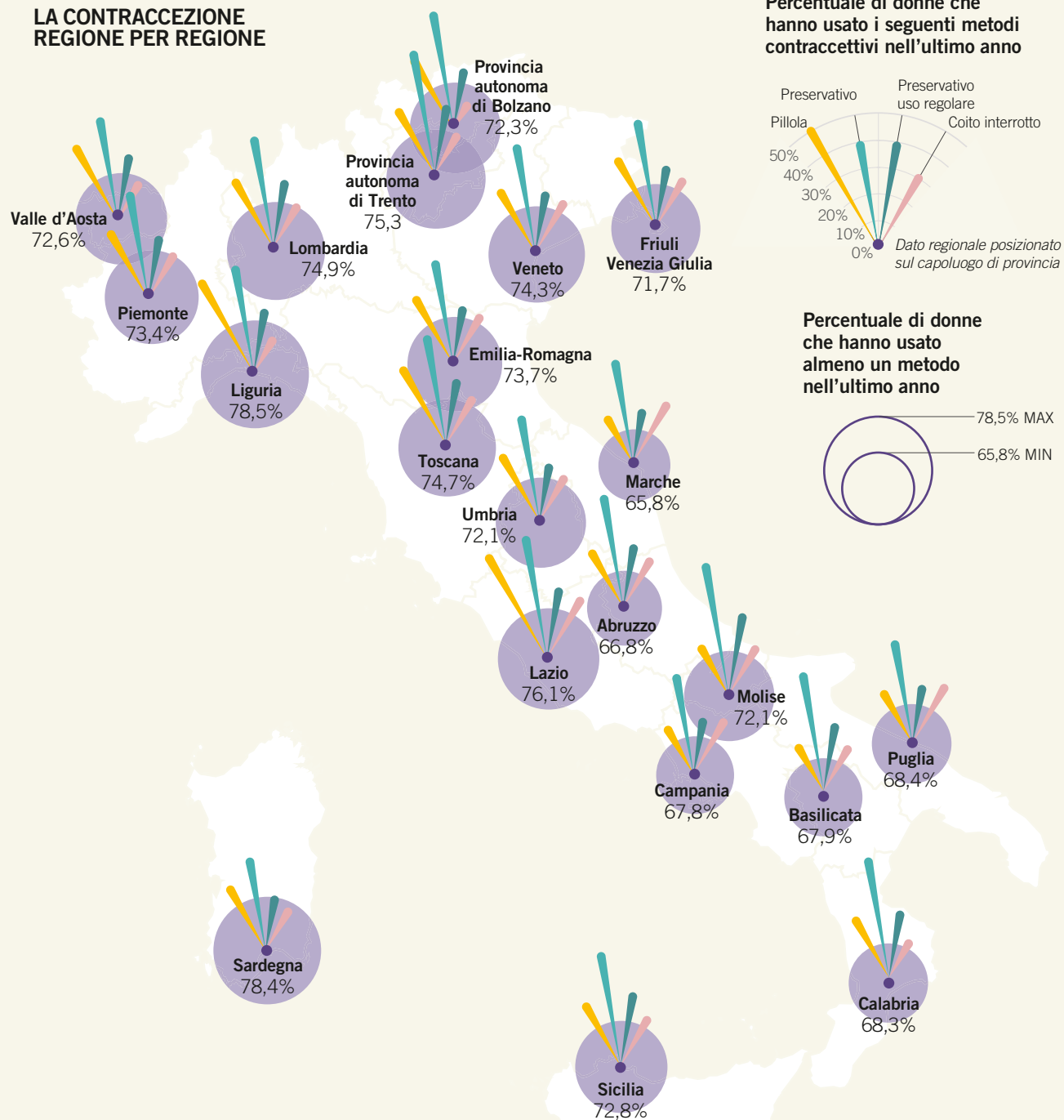
Eppure, in Italia il fenomeno delle gravidanze fra adolescenti non è molto diffuso rispetto ad altri paesi europei, né si riscontra un aumento delle interruzioni volontarie di gravidanza fra le giovanissime. Le ultime stime dell'Organizzazione mondiale della Sanità (OMS) parlano di 5 nati ogni 1000 donne fra i 15 e i 19 anni. Per fare un paragone, fra le britanniche il tasso è di 14 nati ogni 1000 ragazze, in Francia 9,2, in Germania 7,8 e in Spagna 7,7 nati per 1000 ragazze.

LA CONTRACCEZIONE IN ITALIA ED EUROPA

Qualcosa si muove anche in Italia, ma con un ritardo di almeno 45 anni rispetto a molti paesi europei. Negli ultimi vent'anni in realtà non è molto cambiata la percentuale di chi non usa alcun metodo anticoncezionale. È aumentato leggermente l'uso della pillola (+4,5 punti percentuali dal 1996 al 2013), diminuisce il ricorso alla spirale, mentre resta sostanzialmente stabile l'uso del preservativo a ogni rapporto.

100
80
60
40
20
0

Francia 90,1%
Regno Unito 87,6%
Germania 75,1%
Albania 66,4%
Irlanda 65,0%
Danimarca 59,1%
Italia 57,9%
Svizzera 57,4%
Romania 54,4%
Islanda 53,7%
Grecia 48,8%
Russia 42,8%
Polonia 31,5%

Percentuale di donne che hanno usato almeno un metodo nell'ultimo anno (escluso coito interrotto)

https://www.contraceptioninfo.eu (*statistiche contraccezione*)

Nel 2013, considerando anche il coito interrotto, 73 donne su 100 dai 15 ai 49 anni hanno usato nell'anno precedente l'intervista almeno un metodo contraccettivo. Il 19 per cento di queste 73 donne ha usato il coito interrotto, il 25 per cento la pillola anticoncezionale, il 39 per cento almeno una volta il preservativo e il 22 per cento regolarmente il preservativo. Infine, i due restanti metodi ormonali (anello e cerotto) insieme considerati sono scelti da appena il 3,9 per cento delle donne italiane, mentre il diaframma sfiora l'1 per cento.

Un rapporto dell' Agenzia italiana del farmaco sull'uso dei farmaci nel 2017, riporta che i contraccettivi orali sono al secondo posto, con una spesa di 256 milioni di euro, che denota un consumo stabile negli ultimi quattro anni. Le associazioni fisse estro-progestiniche rappresentano quasi l'80 per cento delle dosi della categoria. Importanti aumenti di consumo si evidenziano per i progestinici (+62,0 per cento) e per i contraccettivi di emergenza (+13,5 per cento) come la pillola del giorno dopo.

Fotografia di Jamie Chung

Ovuli al fresco

Congelare ovociti giovani in attesa del momento buono per usarli è la nuova frontiera della procreazione medicalmente assistita

di Valentina Murelli

IN BREVE

Negli Stati Uniti si sta assistendo a un boom del cosiddetto *social egg freezing*, ovvero a un numero sempre più grande di donne sufficientemente giovani che congelano i propri ovociti per un eventuale uso successivo.

In Italia il fenomeno non è ancora diffuso, ma qualcosa inizia a muoversi. Lo dimostra anche l'attenzione da parte di medici e ricercatori del settore della procreazione, che sottolineano le questioni delicate del social egg freezing: età a cui effettuare il prelievo, numero di ovociti da prelevare, efficacia della procedura e costo.

Non ci sono dati certi, però, perché per i centri che in Italia offrono social egg freezing non è obbligatorio dichiararlo al Registro della procreazione medicalmente assistita.

Valentina Murelli, un passato da biologa, è giornalista scientifica freelance.
Negli ultimi anni si è occupata soprattutto, ma non solo, di salute riproduttiva e infantile.

D*onazione di gameti e preservazione della fertilità*. Si intitolava così uno dei corsi precongressuali che lo scorso novembre, a Milano, ha inaugurato il terzo congresso nazionale della Società italiana di riproduzione umana (SIRU). Qualche settimana prima, un altro congresso di medicina della riproduzione, dal suggestivo titolo di *Forever Fertile*, «fertile per sempre», si era aperto all'IRCCS Humanitas di Rozzano, vicino a Milano, con un intervento di Pasquale Patrizio, professore di ginecologia alla Yale University e direttore dello Yale Fertility Center, sulla posticipazione progressiva dell'età della maternità.

In entrambi i casi al centro del discorso c'era il cosiddetto *social egg freezing* o, come alcuni preferiscono chiamarlo, l'autoconservazione degli ovociti in un'ottica di preservazione della fertilità. In pratica, il congelamento dei propri gameti o cellule della riproduzione – gli ovociti, appunto – da parte di donne ancora sufficientemente giovani, per un eventuale uso successivo. «La capacità riproduttiva di una donna diminuisce con il tempo, al diminuire del numero e della qualità degli ovociti disponibili, e lo fa in modo drastico già tra i 35 e i 39 anni di età», spiega Patrizio. «Non significa che non si possa avere un bambino naturalmente a 40 anni, ma dai 38 anni in poi riuscirci diventa più difficile e richiede più tempo, fino a risultare quasi impossibile dopo i 44-45 anni». Da qui l'idea di congelare gli ovociti in un momento in cui godono ancora di buona salute per recuperarli in seguito, se si desidera cercare una gravidanza che altrimenti sarebbe difficile ottenere.

È un tema del quale in Italia non si parla ancora molto, a parte una breve fiammata di interesse registrata qualche anno fa, nel 2014, quando dagli Stati Uniti era arrivata la notizia che due *super big* della Silicon Valley come Facebook e Apple (in seguito si aggiungerà Google) avevano inserito tra i benefit aziendali per le proprie dipendenti anche 20.000 euro a copertura del congelamento di ovociti, in attesa del momento buono per provare ad avere un figlio. Come vedremo, però, qualcosa comincia a muoversi anche da noi.

Freddo estremo procreativo

Il congelamento degli ovociti non è una novità: è impiegato da anni nell'ambito dei percorsi di fecondazione *in vitro*. «In Italia ne abbiamo fatto ampio uso quando la Legge 40 del 2004 sulla procreazione medicalmente assistita (PMA) ci impediva di congelare gli embrioni», afferma Paolo Emanuele Levi-Setti, direttore del Dipartimento di ginecologia e medicina riproduttiva dell'Humanitas. «Poi questo divieto è caduto, ma si continuano a congelare ovociti per non rischiare di avere un numero di embrioni congelati eccessivo rispetto alle aspettative riproduttive della donna e della coppia». Eventuali ovociti «avanzati» sono infatti più facilmente gestibili degli embrioni in sovrannumero: a differenza di questi ultimi, quando si decide che non saranno più utilizzati possono essere distrutti, donati per la ricerca, donati in forma anonima e gratuita ad altre coppie infertili. Secondo i dati dell'ultima relazione al Parlamento sulla PMA dell'Istituto superiore di Sanità (ISS), nel 2017, a fronte di 53.000 cicli di fecondazione in vitro, circa 17.500 hanno comportato crioconservazione di ovociti.

Non solo: da una ventina d'anni il congelamento di queste cellule è praticato, oltre che direttamente in percorsi di PMA, anche per ragazze o donne che corrono il rischio di veder svanire la propria fertilità in conseguenza di malattie o di terapie per curarle. Succede a chi soffre di menopausa precoce o di gravi forme di endometriosi che interessano le ovaie, o è colpita da un tumore: se da un lato chemioterapia e radioterapia salvano la vita, dall'altro possono compromettere in modo irreversibile la capacità riproduttiva. Per evitare che la possibilità di avere un figlio proprio vada perduta per sempre, allora, si prelevano gli ovociti – o una porzione di tessuto ovarico – e li si mette da parte, in freezer.

«Si chiama preservazione oncologica della fertilità e in Italia finora l'hanno fatta 2583 pazienti, per un totale di oltre 21.600 ovociti congelati, con una media di 7-8 per donna», racconta Giulia Scaravelli, direttrice del Registro nazionale della PMA dell'ISS. «Un altro migliaio di donne ha eseguito con lo stesso scopo il prelievo e congelamento di tessuto ovarico, che al bisogno deve essere reimpiantato». Passata la malattia, se si desidera un figlio è possibile recuperare gli ovociti congelati per iniziare un percorso di fecondazione in vitro, oppure farsi reimpiantare il tessuto ovarico e tentare il concepimento naturale. «Un percorso lungo e complesso, certo, ma molto significativo anche per il contributo che il semplice occuparsi della prospettiva futura della fertilità dà al processo di guarigione di queste donne e soprattutto allo stato d'animo con il quale lo affrontano», commenta Levi-Setti.

Arrivare a questi traguardi non è stato semplice. Nel caso degli uomini, sia ottenere gameti (spermatozoi) sia congelarli è relativamente immediato, e in effetti la prima nascita da spermatozoi congelati di cui si abbia notizia risale al 1953. Per le donne già il prelie-

Fotografia di Jamie Chung

Per il gelo istantaneo. Dispositivi per la vetrificazione, come l'S-Cryolock (*nella foto*), aiutano a congelare ovociti ed embrioni quasi istantaneamente in modo da prevenire danni.

vo degli ovociti, ben protetti all'interno dell'ovaio, è complicato. All'inizio lo si faceva con un intervento in laparoscopia che permetteva di estrarre un singolo ovulo nel momento preciso dell'ovulazione (con tassi di riuscita della procedura di fecondazione in vitro molto bassi). Poi è arrivata la possibilità di far maturare contemporaneamente più ovociti attraverso la somministrazione di ormoni (la fase di stimolazione di un ciclo di PMA) e quella di prelevarli pungendo l'ovaio con un ago introdotto per via vaginale, con sedazione profonda della donna (il *pick up*). Ma anche il congelamento ha comportato grandi ostacoli, tanto che la prima nascita da ovociti congelati è avvenuta solo nel 1986.

«Gli ovociti sono tra i sistemi biologici più complicati da congelare perché sono molto grandi, sono ricchi di acqua e contengono strutture cellulari particolarmente delicate come il fuso mitotico, coinvolto nella divisione cellulare», spiega Filippo Maria Ubaldi, direttore del centro di PMA Genera presso la Clinica Valle Giulia di Roma e autore di una *review* sulla storia della crioconservazione degli ovociti pubblicata a inizio 2019 sugli «Acta Obstetricia et Gynecologica Scandinavica».«Durante il congelamento possono formarsi cristalli di ghiaccio che rischiano di danneggiare gli organuli della cellula e provocarne la morte, mentre altri danni possono insorgere durante lo scongelamento».

Per aggirare il problema, oltre a proteggere l'ovocita con crioprotettori (sostanze analoghe all'antigelo che impediscono la formazione di cristalli), per molto tempo la procedura d'elezione ha previsto un congelamento molto, molto lento. «Se eseguita nel migliore dei modi, questa tecnica consente un tasso di sopravvivenza dopo lo scongelamento pari al 70-80 per cento», sottolinea Ubaldi. Molti centri la usano ancora, ma altri sono passati a quella che è considerata la tecnica più rivoluzionaria degli ultimi 15 anni nell'ambito della PMA: il congelamento veloce, o vitrificazione. La differenza sta nell'uso di quantità più elevate di crioprotettori e soprattutto nell'immersione diretta dell'ovocita in azoto liquido a −186 gradi Celsius: si innesca così un raffreddamento ultrarapido che minimizza la formazione di cristalli di ghiaccio e conferisce quasi istantaneamente alla cellula la consistenza del vetro.

«Vari studi confermano che la vitrificazione è più efficiente del congelamento lento sia in termini di resa, per cui sopravvivono più ovociti, sia in termini di qualità degli embrioni ottenuti», conclude Ubaldi. Oltre che per gli ovociti, questa tecnica è usata anche per gli embrioni, e si sta valutando di congelare così anche spermatozoi e tessuto ovarico. «In Italia – sottolinea Levi-Setti – non la praticano ancora tutti, perché richiede grande esperienza e abilità degli operatori ed è molto costosa, ma di sicuro è destinata a un'ulteriore diffusione, anche grazie agli avanzamenti nel campo dell'automazione».

Garantirsi la procreazione

Anche in virtù di questa rivoluzione tecnologica, il congelamento degli ovociti negli ultimi anni ha finito per uscire dall'ambito medico per investire la società tutta, con la nuova tendenza alla preservazione «sociale» della fertilità. Quella che appunto non riguarda donne con problemi di fertilità – o che per certo potrebbero averne in futuro – ma donne giovani e fino a prova contraria fertili, alle quali si propone di mettere in freezer una scorta di gameti come assicurazione sul futuro riproduttivo.

Come spesso accade, tutto è cominciato negli Stati Uniti, in particolare dall'idea di alcune grandi aziende di inserire la crioconservazione di ovociti tra i benefit per le dipendenti. Dalle prime esperienze in questo senso in poi, c'è stato un boom di congelamento:

Il grande fratello degli embrioni

Oltre alla vitrificazione, negli ultimi anni altre tecnologie coinvolte nella fecondazione in vitro hanno visto miglioramenti decisivi, soprattutto per quanto riguarda gestione e selezione degli embrioni. «Abbiamo mezzi di coltura sempre più raffinati, con composizioni che rispecchiano in modo molto accurato l'ambiente delle tube di Falloppio nelle quali l'embrione passa i suoi primi giorni», spiega Paola Viganò, biologa del Centro di scienze della natalità dell'IRCCS San Raffaele di Milano e presidentessa della SIRU.

Altri progressi hanno riguardato l'automazione, con lo sviluppo di incubatori che permettono di disturbare il meno possibile gli embrioni stessi, e l'avvento della tecnologia *time-lapse* per lo studio della morfocinetica dello sviluppo. Spiega Viganò: «Lo sviluppo di ogni singolo embrione è videoregistrato e analizzato con un algoritmo che stabilisce con precisione quante cellule dovrebbero esserci momento per momento. Se registra qualche anomalia, significa che non tutto è andato come avrebbe dovuto, per cui si dà priorità ad altri embrioni per il trasferimento in utero».

A proposito di trasferimento, un'altra novità degli ultimi anni sta nel fatto che non avviene più in terza giornata, quando l'embrione era costituito solo da otto cellule, ma in quinta, quando di cellule ce ne sono circa 300: è lo stadio di blastocisti, più robusto e più resistente anche a un eventuale congelamento e scongelamento. Proprio il trasferimento in questo stadio ha reso possibile la diffusione di un'altra, sofisticata, tecnica per la selezione degli embrioni: lo screening genetico preimpianto, che comporta una biopsia di una decina di cellule per diagnosticare eventuali aneuploidie, cioè alterazioni del numero cromosomico (che diventano sempre più frequenti all'aumentare dell'età materna).

«Attenzione», chiarisce Viganò. «Non va confusa con la diagnosi genetica preimpianto, che viene fatta nel caso di coppie portatrici di malattie genetiche per individuare eventuali embrioni malati. Con lo screening preimpianto non si cercano anomalie genetiche specifiche, si valuta l'assetto cromosomico generale». L'obiettivo è identificare embrioni aneuploidi, con elevata probabilità di non impiantarsi o di dare origine a feti non vitali, per evitare di trasferirli, risparmiando alla donna una mancata gravidanza o un aborto precoce.

Sull'argomento è in corso un'accesa discussione a livello internazionale tra chi ritiene che lo screening preimpianto vada offerto a tutte le donne che si sottopongono a fecondazione in vitro e chi invece ritiene che debba essere proposto solo in casi selezionati. Nel 2017, per esempio, la Società italiana di genetica umana lo ha raccomandato solo in caso di età materna superiore ai 35 anni, precedenti cicli di PMA con fallimento di impianto, poliabortività e particolari anomalie degli spermatozoi (il documento relativo è in corso di revisione).

«Il punto critico sta nel fatto che le cellule di un embrione possono non essere tutte uguali dal punto di vista genetico: un fenomeno chiamato mosaicismo» spiega Viganò. Fino a pochissimi anni fa gli embrioni con queste caratteristiche venivano scartati (o distrutti, dove è possibile farlo), ma si è scoperto che un embrione con mosaicimo non si sviluppa necessariamente in un feto malato: alcuni embrioni possono «autocorreggersi», allontanando le cellule con anomalie cromosomiche. «E un altro tema di discussione – conclude la biologa – riguarda il fatto che per quanto non ci siano ancora dati definitivi in proposito, non si può escludere che la biopsia praticata all'embrione sia del tutto senza conseguenze».

oggi molti cicli di stimolazione ovarica eseguiti annualmente in cliniche storiche della fertilità riguardano il social freezing (il 40 per cento, per esempio, nella clinica della University of Southern California), e nel settore si sono lanciate anche microcliniche specializzate, caratterizzate da un marketing sofisticato e talvolta aggressivo. Come quello di KindBody, che in grandi città come New York e Los Angeles «marca» il territorio con ricercati furgoncini gialli piazzati in prossimità di palestre o saloni di bellezza frequentati da giovani donne: queste sono invitate a fare un salto all'interno per «prendere in mano il proprio futuro», come recitano le scritte sulle fiancate, imparando a proteggere la propria fertilità. Cioè a congelare gli ovociti per una cifra che si aggira intorno ai 10.000 dollari, più 500-600 dollari all'anno per la conservazione futura. Conservazione che donne passate attraverso il non banale percorso di stimolazione ormonale e pick up degli ovociti sono motivate a proseguire a lungo.

Secondo la giornalista statunitense Liza Mundy, l'impennata dei congelamenti è legata a diversi fattori: dall'uso disinvolto e abituale dei *social media* da parte dei *millennial* (il target delle strutture che propongono social freezing, non a caso assai attive su Instagram e Twitter), all'assuefazione a pagare quote mensili per un prodotto o servizio, per cui gli ovociti in freezer diventano una spesa in più che si aggiunge a Netflix e Spotify. «Quello principale, però, è la progressiva posticipazione dell'età della maternità», sostiene Patrizio, sottolineando che negli Stati Uniti l'età media al primo figlio è passata negli ultimi vent'anni da 26 a 28,5 anni. E la stessa tendenza si è verificata in Canada e in molti paesi europei, a partire dall'Italia. Secondo i dati dell' Organizzazione per la cooperazione e lo sviluppo economico (OCSE), nel nostro paese l'età media al primo figlio è salita dai 29,8 anni del 1995 ai 31,9 del 2017: dato che ci colloca tra i paesi OCSE dove si arriva più tardi alla prima gravidanza, seguiti solo da Giappone, Spagna, Irlanda e Corea del Sud. «Accanto a questo andamento – prosegue Patrizio – bisogna citare anche l'aumento di donne che hanno figli dopo i quarant'anni, sia naturalmente sia con il ricorso alla PMA».

A questo proposito, un articolo pubblicato nel 2017 su «Human Reproduction Open» da un gruppo di lavoro della Società europea di riproduzione umana ed embriologia mostra che, in parallelo alle donne che si rivolgono a un centro di PMA dopo i quarant'anni di età, sta crescendo anche il ricorso all'ovodonazione. Ovvio che, in un contesto del genere, la prospettiva di mettere ovociti giovani in fresco in attesa del momento buono per usarli possa sembrare più che sensata. E in effetti il boom del congelamento non riguarda solo gli Stati Uniti. Secondo i dati dell'Associazione israeliana per la fertilità, per esempio, in Israele nel 2014 sono state meno di 100 le donne che hanno richiesto la procedura; due anni dopo erano già quasi 1000 e la tendenza è in crescita.

In Italia per ora il fenomeno è marginale. Dati certi non ce ne sono, perché per i centri che offrono social egg freezing non è obbligatorio dichiararlo al Registro della PMA, ma Scaravelli racconta a «Le Scienze» che per il 2017 la stima è di un centinaio di procedure eseguite in una trentina di centri. In ogni caso si comincia a parlarne: nei congressi, come abbiamo visto, ma non solo. Qualche mese fa, per esempio, la Fondazione PMA-Italia, che riunisce

Raffreddare per conservare. Ovuli ed embrioni congelati in un contenitore raffreddato con azoto liquido. Se eseguita nel migliore dei modi, la tecnica del congelamento porta a un tasso di sopravvivenza dopo lo scongelamento pari al 70-80 per cento.

Ted Horowitz/ Corbis Documentary/Getty Images Plus

70 centri (pubblici e privati) che forniscono il 70 per cento delle prestazioni di PMA nel nostro paese, ha lanciato sul Web la Campagna del cavolo: un progetto di sensibilizzazione sui temi della fertilità che già in *homepage* presenta il social egg freezing come «una scelta concreta per garantire a tutte le donne la possibilità di una gravidanza in età più avanzata».

Fattori da ponderare

Secondo il ginecologo Luca Mencaglia, presidente della fondazione e direttore del centro (pubblico) di PMA Santa Margherita – La Fratta di Cortona, il tema oggi è cruciale: «Vari fattori sociali spingono le donne ad avere figli sempre più in là negli anni, ma questo entra in conflitto con la loro reale capacità riproduttiva. Le donne, soprattutto quelle più giovani, devono saperlo e devono sapere che la conservazione degli ovociti rappresenta una possibilità di spostare in avanti l'età in cui cercare una gravidanza». Per il ginecologo Antonino Guglielmino, direttore del Centro PMA Hera di Catania e co-presidente della SIRU, «è vero che per ora le donne italiane non stanno chiedendo di fare social freezing ma potrebbero farlo presto, e noi dobbiamo essere pronti a dare risposte legittime dal punto di vista medico ed etico». Ragione per cui la SIRU ha deciso di aprire il suo congresso anche con un corso su questo tema.

La questione è delicata per vari motivi, «a partire dal fatto – evidenzia Guglielmino – che prevede la prescrizione di farmaci e l'esecuzione di un intervento, per quanto mini-invasivo, in donne perfettamente sane». A livello mondiale, inoltre, non c'è accordo tra gli esperti sull'età ottimale alla quale effettuare il congelamento. C'è chi dice il prima possibile, tra i 25 e i 30 anni, quando la qualità degli ovociti è ottima, ma in questo caso c'è il rischio che non ne valga davvero la pena. «Nella mia esperienza e in quella di molti colleghi chi decide di congelare gli ovociti lo fa perché non ha un partner fisso», racconta Patrizio. «Ma come si fa a sapere a 25 anni che di sicuro nei 10-15 anni successivi questo partner non arriverà, o che di sicuro si preferirà dare spazio prima alla carriera? Di fatto, prima si congela meno è probabile che gli ovociti siano usati, perché in mezzo ci si mette la vita, e dunque la possibilità di avere un figlio naturalmente, o la decisione di non averlo del tutto se il partner giusto non è arrivato». Per questo motivo, altri esperti consigliano di congelare più tardi, dopo i 30 ma prima dei 35-36 anni, quando ancora gli ovociti hanno una buona o discreta qualità e le traiettorie di vita possono essere più chiare. Secondo un modello pubblicato nel 2015 su «Fertility and Sterility» da Tolga Mesen e colleghi dell'Università del North Carolina, il momento ottimale per il congelamento di ovociti in termini di rapporto costi-efficacia si colloca addirittura a 37 anni. In ogni caso, Patrizio sottolinea che secondo i pochi studi disponibili sull'argomento il tasso di recupero degli ovociti congelati per social freezing è in generale molto basso, tra il 3 e il 9,3 per cento.

Un'altra questione controversa riguarda il numero di ovociti da mettere in freezer. Secondo un modello matematico descritto nel 2017 su «Human Reproduction» da Randi Goldman, della Harvard Medical School, questo numero è correlato all'età al momento del congelamento: a 34 anni servono circa dieci ovociti per avere il 75

Le nuove frontiere della riproduzione

Dal punto di vista clinico, dopo l'aumento delle possibilità di successo l'altro grande avanzamento ottenuto negli ultimi anni nell'ambito della PMA è stata la riduzione delle gravidanze multiple, che sono associate a esiti peggiori sia per le mamme, con maggior rischio di diabete gestazionale e preeclampsia, sia per i feti (maggiori probabilità di aborto, restrizione della crescita fetale, parto pretermine). Questa diminuzione si spiega con la tendenza a trasferire in utero un solo embrione per volta, rispetto ai due o tre che si trasferivano pochi anni fa: secondo il Registro della PMA in Italia siamo passati dal 14,9 per cento delle gravidanze gemellari nel 2015 al 12 per cento nel 2017.

Ma all'orizzonte ci sono prospettive sempre più radicali. Il trasferimento mitocondriale, per esempio: una tecnica che punta a eliminare il rischio di malattie genetiche legate ad alterazioni del DNA mitocondriale (trasmesso solo per via materna) trasferendo il nucleo dell'ovocita della futura mamma portatrice di queste alterazioni nell'ovocita di una donatrice che ne sia priva e da cui il nucleo sia stato eliminato. È una tecnica controversa, possibile nel Regno Unito dal 2015 ma vietata in molti paesi.

Una prospettiva affascinante è inoltre quella di generare gameti – sia spermatozoi sia ovociti – in vitro, a partire da cellule staminali di origine somatica: nel topo, ovociti funzionali sono stati prodotti a partire da staminali di tipo iPS già nel 2012. E ancora: studi effettuati per lo più in modelli murini suggeriscono che potremmo essere vicini a scardinare uno dei dogmi sui quali si è fondata la medicina della riproduzione negli ultimi cinquant'anni, cioè l'immodificabilità della riserva ovarica della donna e dunque della sua capacità riproduttiva. Contrariamente a quanto si è sempre pensato, appare sempre più fondata l'ipotesi che anche nell'ovaio ci siano staminali, che in futuro potrebbero essere usate per modulare il processo di invecchiamento dell'ovaio stesso e dei suoi ovociti, allungando la finestra di fertilità della donna.

Sarebbe una rivoluzione quasi inimmaginabile, ma nel 1978 anche la nascita di Louise Brown, la prima persona al mondo a essere concepita in provetta, lo è stata.

per cento di probabilità di successo (cioè ottenere una gravidanza che si conclude con la nascita di un bambino vivo), mentre già a 37 anni ne servono 20, e sempre di più per ogni anno che passa. Mettere via 10 o 20 ovociti, però, tendenzialmente significa doversi sottoporre a più di un ciclo di stimolazione e prelievo, considerato che anche nel caso di donne giovani si ottengono in media 7-8 ovociti per ciclo. Con tutti i disagi (e costi) del caso.

E ancora, c'è la questione fondamentale che mettere in freezer un ovocita non significa metterci un bambino, ma solo la sua potenzialità. Sebbene i dati a disposizione dicano che se il congelamento è avvenuto con tutti i crismi non ci sono differenze significative tra l'uso di ovociti congelati e quello di cellule fresche, tutta la procedura rimane un percorso a ostacoli: bisogna che l'ovocita resti vivo dopo lo scongelamento, che venga fecondato, che si sviluppi un embrione e che – dopo il trasferimento in utero – questo attecchisca avviando una gravidanza e che, a sua volta, questa si concluda con la nascita di un bambino vivo.

«È una possibilità in più, questo sì, ma non è una certezza, e questo punto deve essere molto chiaro, altrimenti le donne rischiano di andare incontro a una tremenda delusione se 5, 10 o 15 anni dopo il congelamento tornano a prendere i loro ovociti ma non riescono ad avere un bambino», afferma Patrizio. Sottolineando che dopo i 45 anni anche disporre di un'ovocita più giovane non è garanzia di successo, perché in campo entrano anche altri aspetti, come l'invecchiamento dell'utero e di altri organi materni, che possono rendere la gravidanza meno probabile e a maggior rischio di complicazioni ostetriche.

Infine c'è la questione, non irrilevante, dei costi. In Italia un ciclo di social freezing costa circa 4000-5000 euro, come una settimana di vacanze alle Maldive, più una cifra tra 100 e 500 euro all'anno per la conservazione. Il costo è tipicamente a carico della donna, il che significa che la procedura non è cosa per tutte. C'è però una novità in questo senso, ed è il fatto che dal 2018 Toscana e Provincia autonoma di Trento hanno deciso di offrire la copertura dei costi del social freezing alle donne che accettino, in cambio, di «regalare» alcuni loro ovociti a coppie infertili che abbiano bisogno di un'ovodonazione nel loro percorso di PMA. Operazione che da un lato apre a tutte la possibilità del congelamento di ovociti per il futuro e dall'altro offre una soluzione concreta a quella che è considerata una delle criticità principali della PMA in Italia in questo momento, cioè la carenza di ovociti da donatrici italiane per la fecondazione eterologa.

Quasi tutti dall'estero

I dati del Registro della PMA lo dicono chiaramente: nel 2017, a fronte di 3149 cicli con donazione di ovociti, ben 3035 (il 96 per cento) hanno usato cellule crioconservate importate da una banca estera, nella stragrande maggioranza dei casi spagnola. «È una situazione che dipende da vari fattori», chiarisce Scaravelli. «Tra questi, la mancanza di un'adeguata campagna informativa sull'argomento, anche per ritardi burocratici nel recepimento di una normativa europea che dettava i requisiti di sicurezza su trapianti d'organo, di tessuti e di cellule (comprese quelle riproduttive) e l'impossibilità, per la nostra normativa, di offrire un compenso alle donne donatrici, come previsto invece in altri paesi».

Per il momento, ricorrere a ovociti di banche estere è comunque una buona possibilità, non esente tuttavia da criticità. Guglielmino, per esempio, sottolinea l'aspetto della sicurezza: «In Italia i controlli sono effettuati dal Centro nazionale trapianti e sono rigorosissimi, anche per i centri privati, mentre non abbiamo garanzie che lo siano altrettanto anche all'estero». Scaravelli, invece, si sofferma sull'equità sociale: «Quando nel 2014 una sentenza della Corte Costituzionale ha reso possibile effettuare anche nel nostro paese la fecondazione eterologa, scardinando uno dei punti chiave della Legge 40 sulla PMA, solo tre Regioni – Toscana, Friuli Venezia Giulia ed Emilia-Romagna – si sono organizzate istituendo convenzioni specifiche con le banche estere. Significa che solo in queste tre regioni le strutture pubbliche o private convenzionate possono offrire anche l'eterologa con copertura dei costi. In tutti gli altri casi, la procedura deve essere pagata dalle coppie, con evidente discriminazione nell'accessibilità». Ecco perché gli specialisti invocano misure specifiche per favorire l'ovodonazione, e in questo senso l'accoppiamento con il social freezing potrebbe effettivamente dare una mano.

C'è tuttavia anche chi auspica che il Servizio sanitario nazionale arrivi a farsi carico del social freezing indipendentemente

Nuovi incubatori. Il dispositivo INVOcell può essere inserito nella vagina di una paziente per far crescere embrioni, in alternativa agli incubatori di laboratorio.

dall'ovodonazione, anche come strategia per promuovere un incremento del tasso di fecondità dove, come in Italia, sia in continua diminuzione (in Italia è di 1,3 figli per donna in età fertile, uno dei più bassi d'Europa). Al momento, però, il social freezing non sembra molto sostenibile dal punto di vista del rapporto costo-efficacia: in un articolo pubblicato nel 2018 su «Reproductive Biomedicine Online», Zion Ben-Rafael, dell'Unità di fecondazione in vitro del Laniado Medical Center di Netanya, in Israele, ricorda che secondo vari modelli la procedura è economicamente sostenibile solo quando almeno il 50 per cento degli ovociti viene effettivamente usato, e il fatto di essere sposate non è posto come condizione per usarli.

Anche l'idea di annoverare il social freezing tra le possibili soluzioni al problema della denatalità progressiva del nostro paese – come per altro sembra fare anche la Campagna del cavolo - presenta parecchi limiti. «Ci sono due ragioni principali per cui in Italia si fanno così pochi figli, a fronte di un desiderio dichiarato di averne, in media, un paio», spiega Alessandro Rosina, professore di demografia e statistica sociale all'Università Cattolica del Sacro Cuore di Milano. «Per cominciare c'è il fatto che al primo figlio si arriva sempre più tardi sia perché i giovani, che ottengono tardi un pieno inserimento nel mercato del lavoro, posticipano l'uscita dalla famiglia d'origine, sia perché anche da noi si sta verificando, come in altri paesi, il fenomeno per cui donne sempre più istruite faticano a trovare un partner che ritengono adeguato». È quanto descritto nel 2015 dal giornalista economico statunitense Jon Birger nel libro *Date-onomics*: a differenza degli uomini, che tendenzialmente accettano partner con livello di istruzione inferiore al loro, le donne cercano partner «alla stessa altezza», ma negli Stati Uniti come altrove le donne con elevato livello di istruzione stanno diventando sempre più numerose degli uomini, per cui faticano a trovare il compagno ideale. «In Italia – precisa Rosina – è una donna su tre ad avere una laurea, contro un uomo su cinque».

Fotografia di Jamie Chung

Le responsabilità della politica

Il ritardo nella formazione della famiglia non è però l'unico fattore che concorre alla nostra denatalità. «L'altro elemento è che quando si arriva a fare un figlio non solo può essere biologicamente tardi per farne un secondo, ma soprattutto ci si rende conto che da noi la famosa conciliazione lavoro-famiglia è un miraggio (perché non ci sono investimenti adeguati in politiche familiari e non c'è sufficiente collaborazione maschile) e quindi non lo si fa».

Concorda Cristina Solera, ricercatrice in sociologia dell'Università di Torino ed esperta di sociologia della famiglia. «I dati relativi ai paesi OCSE mostrano chiaramente che i paesi con elevato tasso di istruzione e di occupazione femminile sono, contrariamente a quanto si è affermato a lungo sia nel dibattito scientifico sia in quello pubblico, anche quelli con il tasso di fecondità più elevato. A patto che, come accade per esempio nei paesi del Nord Europa, l'occupazione femminile si accompagni a un *welfare* generoso in termini di sostegno alle famiglie, dunque congedi parentali adeguati, asili nido e così via, e a una maggiore condivisione della responsabilità di cura tra donne e uomini». Per questo per Solera è profondamente riduttivo appiattire il discorso sulla fertilità alla sola questione biologica e medica, come aveva fatto la fallimentare campagna comunicativa sul Fertility Day promossa nel 2016 dal Ministero della salute, che invitava le donne «a darsi una mossa».

La questione biologica certo è importante, e va benissimo programmare campagne che informino ragazze e giovani donne del fatto che la fertilità femminile non è eterna (magari senza ricorrere alle solite affermazioni semplificatorie e paternaliste «sull'importanza e la bellezza di avere figli», come fa la Campagna del cavolo), e che neppure la PMA ha il potere di rimettere indietro le lancette dell'orologio biologico, ma non ci può fermare qui. «La questione del calo della fertilità coinvolge precise responsabilità politiche – afferma Solera – in termini di politiche di mercato del lavoro, di welfare, ma anche di maggiore o minore accettazione del modello di famiglia "giusto" in cui fare figli. Perché un altro dato di fatto è che si fanno più bambini nei paesi in cui c'è una maggiore accettazione della possibili varietà di questo modello, che può riguardare coppie sposate ma anche conviventi, *single* o coppie omosessuali». E su questi aspetti non c'è ovocita congelato che tenga. ■

PER APPROFONDIRE

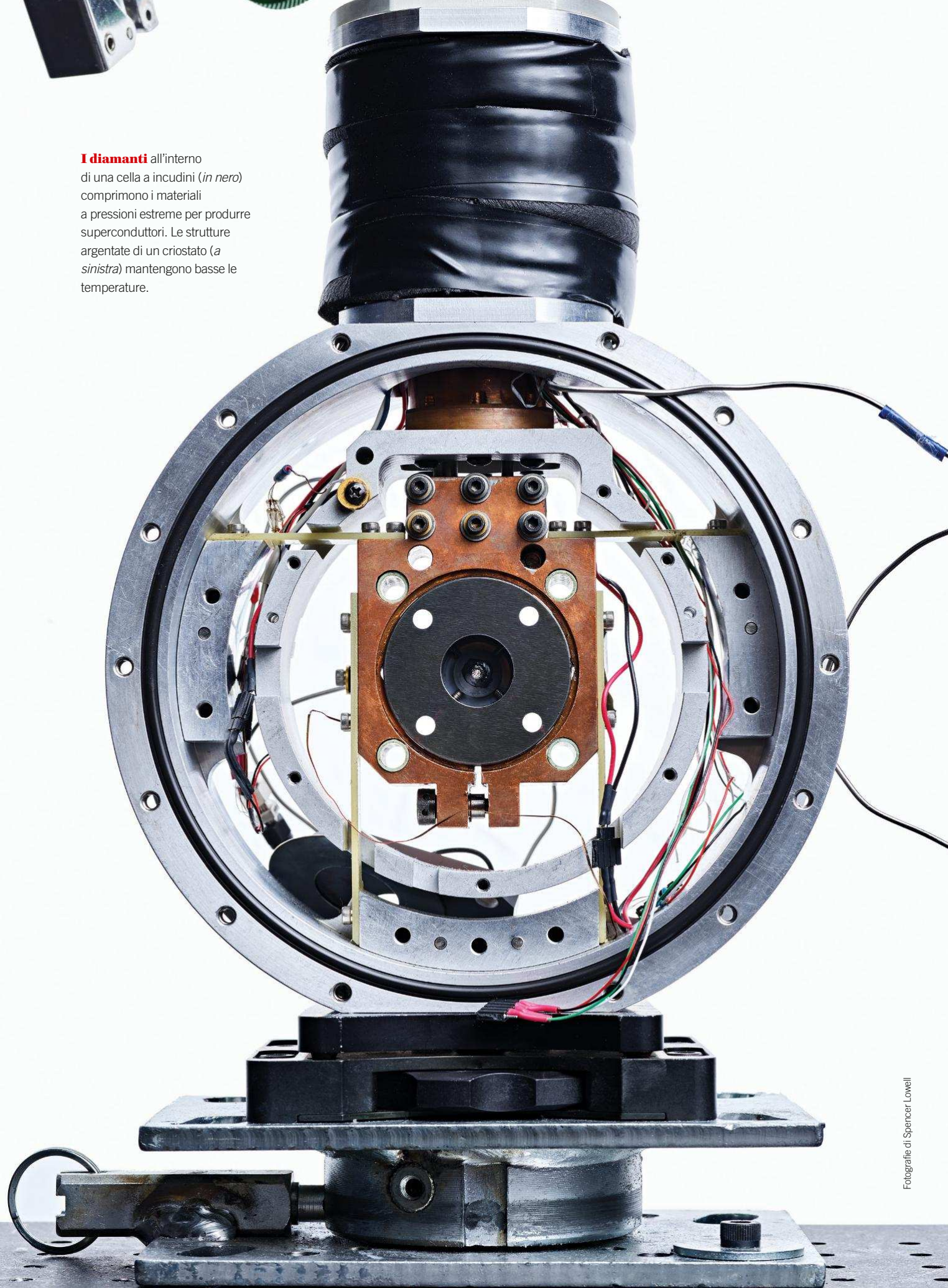
A Brief History of Oocyte Cryopreservation: Arguments and Facts. Iussig B e altri, in «Acta Obstetricia et Gynecologica Scandinavica», Vol. 98, pp. 550-558, maggio 2019.

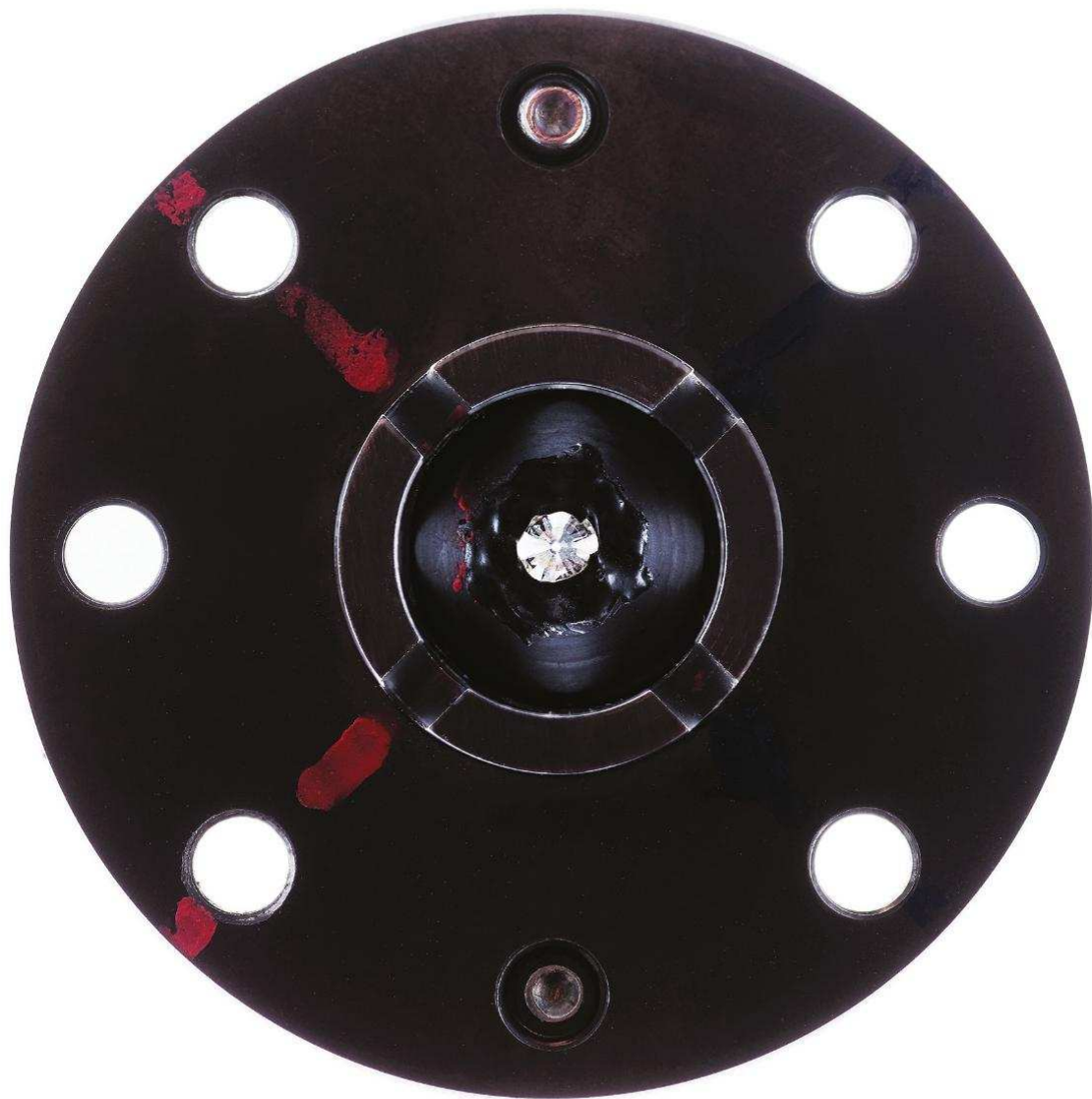
The Dilemma of Social Oocyte Freezing: Usage Rate Is Too Low To Make It Cost-Effective. Ben-Rafael Z., in «Reproductive Biomedicine Online», Vol. 37, pp. 443-448, ottobre 2018.

Advanced Maternal Age in IVF: Still a Challenge? The Present and the Future of Its Treatment. Ubaldi F.M. e altri, in «Frontiers in Endocrinology», Vol. 10, art. 94, febbraio 2019

Contribution of Cryopreservation to the Cumulative Live Birth Rate: a Large Multicentric Cycle-Based Data Analysis from the Italian National Registry. Scaravelli G. e altri, in «Journal of Assisted Reproduction and Genetics», 28 agosto 2019.

I diamanti all'interno di una cella a incudini (*in nero*) comprimono i materiali a pressioni estreme per produrre superconduttori. Le strutture argentate di un criostato (*a sinistra*) mantengono basse le temperature.

Fotografie di Spencer Lowell

FISICA

Un superconduttore da sogno

La sfuggente superconduzione a temperatura ambiente potrebbe essere finalmente raggiunta grazie a nuovi progressi teorici e computazionali

di Bob Henderson

Bob Henderson è un autore *freelance*, ha conseguito il dottorato in fisica teorica delle alte energie all'Università di Rochester e si è guadagnato da vivere, via via, come fotoreporter, ingegnere elettrico e analista e trader di derivati finanziari.

Maddury Somayazulu, un fisico sperimentale noto anche come Zulu, sperava che, giunto così vicino alla meta, sarebbe stata la volta buona. Si trovava in una stanza piena di attrezzature dello statunitense Argonne National Laboratory, in Illinois, insieme al ricercatore postdoc Zachary Geballe, chino su un dispositivo cilindrico delle dimensioni di una susina, detto cella a incudini di diamante.

All'interno c'era un campione di lantanio, un metallo delle terre rare, grande come un granello di polvere e un po' di gas di idrogeno: i fisici teorici avevano previsto che avrebbe potuto trasformarsi in un nuovo composto sotto l'immane pressione di 2,1 milioni di atmosfere.

È più della metà della pressione che si registra al centro della Terra e, cosa più importante quel giorno di giugno 2017, un valore vicino al limite della capacità che ha la cella di comprimere il contenuto tra i suoi due diamanti – tra i materiali più duri in natura – piccoli come sassolini. Mentre gli scienziati stringevano le viti della cella per arrivare a 1,7 milioni di atmosfere, sentivano una certa resistenza. I diamanti, già deformati dalla pressione, si sarebbero potuti rompere. «Ci fermiamo qui. Non possiamo aumentare ancora», aveva detto Somayazulu. «Proviamo a sintetizzare adesso e vediamo che succede».

I due ricercatori avevano circondato la cella a incudini con una squadra di tiratori scelti ad alta tecnologia: due lunghi tubi per bombardarla con raggi X, una costellazione di lenti e specchi per puntarle addosso un laser e una videocamera per registrare l'attacco. Speravano che, una volta attivato, il laser avrebbe catalizzato la reazione lantanio-idrogeno. Fuori dalla stanza, dietro una porta di metallo scorrevole che li proteggeva dalle radiazioni, gli scienziati fissavano uno schermo con la struttura microscopica della loro miscela esaminata ai raggi X. La trama assunse rapidamente la forma desiderata. Erano riusciti a forzare l'esistenza dell'idruro di lantanio, cioè LaH_{10}. «Non ce l'aspettavamo», dice Somayazulu. «Non l'abbiamo neppure dovuto scaldare molto, e il composto si è formato»; e non era un composto qualsiasi.

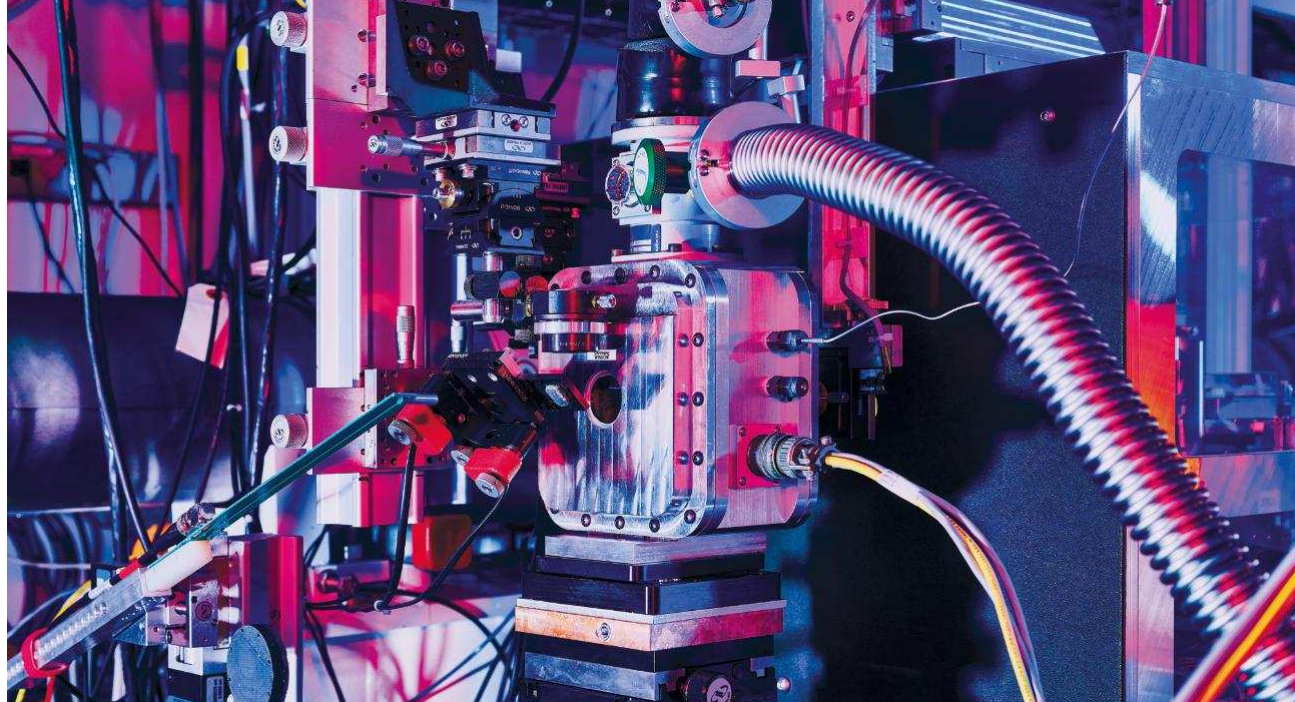
La teoria e i modelli al computer avevano suggerito che LaH_{10} potesse essere un superconduttore, cioè un materiale con la straordinaria capacità di condurre l'elettricità senza le perdite di energia che affliggono i cavi tradizionali. Questa efficienza permette a una quantità incredibile di corrente di essere racchiusa in uno spazio piccolo e di circolare per sempre in una sorta di moto perpetuo. C'è di meglio: si prevedeva che LaH_{10} funzionasse in questo modo magico a circa 7 gradi Celsius (280 kelvin), un temperatura ben più elevata di quella di qualsiasi superconduttore noto, molto vicina alla temperatura ambiente, un obiettivo inseguito da tempo. Le condizioni gelide richieste dai superconduttori esistenti tendono a limitarne l'uso ad applicazioni di nicchia, come gli apparecchi per la risonanza magnetica e gli acceleratori di particelle. Un superconduttore a temperatura ambiente si potrebbe invece usare in molti altri ambiti, tra cui il trasferimento di energia solare ed eolica a distanze maggiori di quelle attualmente praticabili, l'aumento della capacità delle affaticate reti elettriche, la produzione di batterie che non perdono mai la carica e innumerevoli altri usi in informatica e in medicina.

L'analisi ai raggi X osservata da Somayazulu e Geballe indicava che il loro LaH_{10} mostrava l'esatta struttura microscopica prevista dai fisici teorici. «Siamo rimasti colpiti», mi ha detto Somayazulu durante una mia recente visita all'Argonne National Laboratory, dove ha cominciato a lavorare lo scorso maggio. Quando lui e i suoi colleghi hanno sintetizzato LaH_{10}, lavorava ancora per il Geophysical Laboratory della Carnegie Institution for Science di Washington. Il suo direttore di ricerca dell'epoca, Russell Hemley, definisce LaH_{10} «un bellissimo esempio di materiale progettato». Hemley dirigeva il gruppo che aveva creato il composto, nonché il gruppo di teorici che ne aveva previsto l'esistenza e le proprietà. «Abbiamo prima ideato questo materiale su un computer, poi i calcoli ci hanno detto dove cercarlo».

IN BREVE

Gli scienziati sognano di ottenere un superconduttore – cioè un materiale che può condurre l'elettricità senza resistenza – in grado di funzionare a temperatura ambiente. Finora tutti richiedono temperature basse e talvolta pressioni elevate.

Storicamente, nuovi superconduttori sono stati trovati per tentativi ed errori, ma gli algoritmi teorici che usano nuovi strumenti come l'apprendimento automatico per prevedere nuovi materiali superconduttori hanno portato a importanti scoperte.

I fisici sperano che i miglioramenti teorici e sperimentali possano aiutarli a scoprire superconduttori più utili, che potrebbero espandere la portata delle tecnologie dell'energia rinnovabile, migliorare le reti elettriche e darci batterie che non perdono mai la carica.

Nuovi superconduttori si formano all'interno di una cella a incudini di diamante, contenuta nel finestrino circolare centrale di questo criostato all'Argonne National Laboratory.

È stata questa la vera novità di LaH_{10}. Gli scienziati cercano superconduttori ad alta temperatura da oltre un secolo, ma quasi ogni passo avanti è venuto da una combinazione di congetture – cioè, di fatto, provare ingredienti e processi diversi uno per uno, sperando in un successo – e fortuna. In precedenza, solo una volta un programma per computer aveva profetizzato un superconduttore ad alta temperatura, H_3S, un altro composto ad alta pressione identificato nel 2014 che fa parte anch'esso della classe degli «idruri», composti dell'idrogeno, ma in quel caso in realtà i suoi ideatori cercavano qualcos'altro. Le immani pressioni necessarie per mantenere intatti gli idruri, ai limiti della rottura del diamante, rendono altamente improbabile che questi composti possano rivelarsi utili, ma gli algoritmi che li hanno previsti, insieme ad altri recenti progressi computazionali, hanno il potenziale per rendere più sistematica e forse più fruttuosa che mai la ricerca di superconduttori concretamente utilizzabili.

Una teoria della superconduttività

«LaH_{10} è stato davvero una manna dal cielo», commenta Somayazulu, rievocando gli anni di lavoro che hanno portato alla scoperta di questo materiale. Emozionato nel ricordare com'è andata, sembra quasi che ancora non ci creda. Se non fosse per i nuovi algoritmi e le loro previsioni, sarebbe in alto mare, dice, «smarrito» alle prese con «idee grossolane» e «la chimica del liceo».

Ma anche così, una volta fatto apparire LaH_{10}, doveva ancora capire come verificarne la superconduttività. Fin dalla scoperta di questo fenomeno, nel 1911, quando il fisico olandese Heike Kamerlingh Onnes osservò che la resistenza elettrica di un filo di mercurio immerso in elio liquido svaniva inspiegabilmente a 4,2 kelvin, in genere la scoperta di nuovi materiali superconduttori aveva preceduto le teorie che li spiegavano. Sebbene la superconduttività si fosse rivelata sorprendentemente comune, e da allora molte altre sostanze avessero dimostrato di avere questa proprietà (tutte al di sotto di 10 kelvin), non si era riusciti nemmeno a cominciare a darle un senso fino a quando, negli anni venti, fu sviluppata la meccanica quantistica. La spiegazione dipende dal fatto che gli elettroni responsabili dell'elettricità si comportano sia come particelle localizzate sia come onde diffuse, fenomeno che, per la meccanica quantistica, è comune a tutte le particelle subatomiche. Partendo da qui, John Bardeen, Leon N. Cooper e John Robert Schrieffer misero a punto una teoria, oggi nota come BCS (dalle loro iniziali), per descrivere la fisica dei superconduttori, e la pubblicarono nel 1957.

Si basava sulla descrizione fondamentale della corrente: in un metallo gli atomi (in realtà i nuclei atomici più alcuni elettroni legati, che generano ioni carichi positivamente) formano un reticolo cristallino – una struttura con una spaziatura regolare – più un mare di elettroni liberi che, quando viene applicata una differenza di potenziale, fluiscono attraverso il reticolo e formano una corrente elettrica. Normalmente le imperfezioni e le vibrazioni del reticolo dovute al calore ostacolano questo flusso e creano resistenza. Secondo la teoria BCS, però, gli elettroni possono contrastare questo attrito grazie a una sorta di *aikido* quantistico che volge a loro vantaggio i movimenti del reticolo. Innanzitutto, quando un elettrone si muove attraverso il reticolo devia gli atomi del reticolo nella direzione del suo spostamento (a causa dell'attrazione tra la sua carica negativa e la carica positiva del reticolo). Questa deviazione avvicina fra loro le cariche positive e la conseguente concentrazione di carica positiva trascina un secondo elettrone nella scia del primo, legando i due in una cosiddetta coppia di Cooper. In secondo luogo queste coppie, che ora si comportano più come onde che come particelle, si sovrappongono, si sincronizzano e si uniscono in un'unica grande onda, chiamata condensato di Bose-Einstein, che è troppo grande per essere ostacolata dal reticolo e quindi lo attraversa senza resistenza.

La teoria BCS ha previsto molti fenomeni, tra cui le cosiddette temperature critiche al di sopra delle quali i superconduttori perdono i loro superpoteri. Ma in generale è stata di scarso aiuto nella ricerca di nuovi superconduttori con temperature critiche più elevate, al punto che il cacciatore di superconduttori più abile della storia è stato uno sperimentatore di nome Bernd Matthias che riteneva la BCS priva di utilità per le sue ricerche. Tra gli anni cinquanta e settanta Matthias ha scoperto centinaia di superconduttori (molti dei quali sono leghe metalliche) testando nel suo laboratorio innumerevoli materiali, seguendo soprattutto cinque

regole empiriche relative alle proprietà dei materiali (per esempio, «un'alta simmetria va bene») e un principio generale: «Stai lontano dai teorici».

Ma, nonostante i molti successi di Matthias, tra il 1955 e il 1973 la temperatura critica più alta per un superconduttore è aumentata solo di poco, da 17 a 23 kelvin. E lì è rimasta fino al 1986, quando Georg Bednorz e Alex Müller, due scienziati dell'IBM a Zurigo, hanno scoperto la superconduttività in una classe di complesse ceramiche stratificate chiamate cuprati. Questi materiali detengono tuttora il primato per le alte temperature a pressione ambiente, stabilito nel 1993: 135 kelvin. A differenza di Matthias, Bednorz e Müller «avevano una visione teorica molto solida di quello che cercavano», afferma Peter Littlewood, fisico dell'Università di Chicago. «Oggi quelle idee sono probabilmente sbagliate».

Sbagliate perché erano basate sulla teoria BCS e sul modo in cui ricorre alle vibrazioni reticolari atomiche, i cosiddetti fononi, per la creazione delle coppie di Cooper. Sebbene si ritenga che queste coppie, e il condensato di Bose-Einstein che formano, siano effettivamente alla base della superconduttività dei cuprati, oggi molti esperti pensano che i legami di Cooper nei cuprati non si debbano ai fononi (o almeno non solo a essi), ma a qualche forma di interazione elettromagnetica diretta tra gli elettroni. Purtroppo queste interazioni dirette sono così difficili da descrivere con modelli matematici che più di trent'anni di ricerca intensiva non sono riusciti a produrre un equivalente della teoria BCS per i cuprati e neppure a mettere d'accordo tutti sui dettagli del meccanismo di accoppiamento degli elettroni. Gli scienziati raggruppano i cuprati in una categoria generale insieme a diverse altre classi di superconduttori il cui funzionamento sembra dovuto a vari tipi di interazioni dirette elettrone-elettrone. Questi materiali sono chiamati superconduttori non convenzionali per distinguerli dal tipo convenzionale spiegato dai fononi e descritto dalla teoria BCS.

Quindi Bednorz e Müller hanno trovato quello che cercavano, ma non funzionava come pensavano. È una delle tappe fortuite della storia della superconduttività. Per esempio nel 2006, nel corso di ricerche per migliorare i *display* a schermo piatto, sono stati scoperti superconduttori a base di ferro, un'altra classe non convenzionale priva di una teoria che la descriva o la preveda. «Quasi sempre si scopre qualche nuovo materiale strano – commenta Littlewood – che poi ci insegna un nuovo meccanismo per l'accoppiamento degli elettroni a cui non avevamo pensato».

La barriera della temperatura

La superconduttività preferisce il freddo, afferma Michael Norman, scienziato dei materiali all'Argonne National Laboratory, perché «la temperatura è pessima» per mantenere un comportamento ondulatorio quantistico su scale macroscopiche utili. L'energia del calore tende a spezzare i legami nelle coppie di Cooper e a distruggere lo stato quantistico coordinato di un condensato ondulatorio.

Il numero di coppie in un condensato e l'intensità dei legami che le tengono insieme costituiscono una barriera al disturbo termico. La temperatura critica di un superconduttore rappresenta l'altezza di questa barriera: al di sopra di questo punto non resiste al calore. Per esempio si ritiene che le alte barriere dei cuprati derivino dal modo in cui le loro interazioni dirette elettrone-elettrone creano nelle coppie di Cooper legami più intensi rispetto a quelli che provengono dal meccanismo indiretto dei fononi.

Eppure «credo che ora nessuno dubiti della possibilità di un superconduttore a temperatura e pressione ambiente», afferma

Maddury Somayazulu ha trascorso decenni cercando di scoprire superconduttori in grado di funzionare a temperature elevate.

Norman, anche perché continuano ad apparire nuovi superconduttori e meccanismi di accoppiamento. Persino per i superconduttori convenzionali non esiste un «limite fondamentale» alla temperatura critica, afferma Igor Mazin, fisico del Naval Research Laboratory di Washington. Invece, c'è «una sorta di limite statistico», che significa semplicemente che materiali del genere hanno meno probabilità di esistere. L'accoppiamento mediato dai fononi tende a essere più forte nei reticoli atomici meno rigidi (un reticolo perfettamente rigido non potrebbe sostenere la superconduttività convenzionale, che richiede che il reticolo si deformi verso un elettrone). Quindi l'accoppiamento eccezionalmente robusto necessario per la superconduttività convenzionale ad alta temperatura sembra richiedere un tipo speciale di reticolo cristallino, analogo alle strutture elaborate che gli ingegneri impiegano nei ponti per mantenerli robusti nonostante si flettano per il vento.

Quindi i superconduttori a temperatura ambiente, se esistono, sono senza dubbio rari, ma qualche speranza viene dall'immensità dell'ambito in cui cercare: i circa 100 elementi stabili della tavola periodica si possono combinare a due a due in 4950 modi, a tre a tre in 161.700 modi e così via. Se aggiungiamo le scelte stechiometriche (cioè riguardanti i rapporti tra gli elementi in un composto) e la struttura reticolare, le possibilità sono innumerevoli. E allora come si fa a trovare i materiali eccezionali in questo pagliaio chimico?

Il sogno del superconduttore

Una mattina di novembre del 2017 Somayazulu, mentre andava al lavoro, si lambiccava il cervello. Il test per confermare la superconduttività di LaH_{10} non stava andando bene. Richiedeva la sostituzione di una guarnizione metallica nella cella a incudini di

diamante con un materiale isolante per prevenire un corto circuito durante la misurazione della resistenza, ma da mesi ogni configurazione provata soffriva di perdite di idrogeno in forma gassosa. «Tutti i giorni arrivavamo, discutevamo e facevamo un nuovo tentativo», dice Somayazulu. «Era molto frustrante».

Poi quel giorno, nel traffico sulla Capital Beltway di Washington, ha avuto un'idea: «Perché non usiamo una fonte di idrogeno solida?» Somayazulu aveva pensato che l'ammoniaca-borano, una sostanza ricca di idrogeno di cui era a conoscenza da ricerche precedenti, potesse liberare idrogeno nel modo giusto. Dopo diversi mesi di perfezionamento, l'idea ha funzionato. Somayazulu ha osservato precipitare la resistenza di LaH_{10} a 265 kelvin; ha scattato rapidamente una foto con il telefono, dopo di che il computer si è piantato e i diamanti della cella si sono disintegrati. La fotografia era tutto quello che restava della loro impresa, e sarebbero passati altri sei mesi prima che potessero ripeterla.

Somayazulu aveva trascorso quasi un quarto di secolo nel tentativo di comprimere l'idrogeno per farne un superconduttore. Era un sogno che Hemley aveva inseguito per decenni, basandosi su una previsione formulata per la prima volta da Neil Ashcroft, fisico della Cornell University, nel 1968. Ashcroft ammise nel 1983 che potessero essere necessari fino a 10 milioni di atmosfere di pressione per ottenere un materiale di questo tipo, ma teorizzò che un secondo elemento aggiunto all'idrogeno avrebbe potuto ridurre questo requisito facendo da cuneo per spezzare le molecole di H_2 che l'idrogeno tende a formare. Così liberati, gli atomi di idrogeno avrebbero potuto vibrare in modo adatto per la superconduttività ad alta temperatura: i legami flessibili tra questi atomi avrebbero favorito un forte accoppiamento fononico tra gli elettroni, e la loro bassa massa atomica avrebbe favorito i fononi che vibravano a una frequenza insolitamente alta (e quindi con energia elevata), il che avrebbe attirato nel condensato elettroni in grande quantità.

Per anni, dopo essere arrivato dall'India nel 1994 per lavorare con Hemley come studente postdoc alla Carnegie Institution, Somayazulu aveva compresso e riscaldato diligentemente innumerevoli miscele di idrogeno in vari modi, scoprendo molta fisica interessante, ma mai la superconduttività. «Cercavo di drogare sistematicamente l'idrogeno con ogni genere di sostanza», dice. «Lo sottoponevo a pressioni sempre più elevate e non succede nulla, e pensavo: "Forse Ashcroft sbagliava?"».

In realtà Ashcroft aveva ragione, ma per dimostrarlo serviva l'aiuto di una nuova classe di programmi per computer di «ricerca di strutture», che cercano composti promettenti spostando virtualmente gli atomi alla ricerca di una struttura cristallina stabile che, per il secondo principio della termodinamica, è quella con la minima capacità di perdere energia sotto forma di calore. Alcuni programmi usano un approccio evolutivo, che inizia con un gruppo di strutture cristalline, le incrocia, seleziona le «figlie» più adatte affinché si riproducano e ripete il processo fino a trovare il candidato migliore. A quel punto viene applicata la teoria BCS per valutare il potenziale di superconduttività della struttura trovata e stimarne la temperatura critica.

Nel 2012 un gruppo in Cina guidato da Yanming Ma ha usato uno di questi programmi per prevedere, in linea con le idee di Ashcroft, che l'idruro di calcio (CaH_6) poteva essere prodotto alle pressioni generate dalle celle a incudini di diamante ed essere un superconduttore ad alta temperatura. Poco tempo dopo, Hemley e il suo gruppo hanno compresso insieme calcio e idrogeno, e non erano i soli.

COME FUNZIONA

Una teoria per la superconduzione

In un superconduttore, complessi effetti quantomeccanici permettono all'elettricità di fluire senza resistenza. Una teoria nota come BCS dà una descrizione di base del loro funzionamento, anche se ora si ritiene che i dettagli di molti materiali superconduttori siano più complicati. Il processo BCS si svolge così:

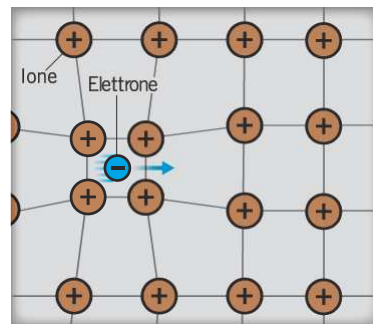
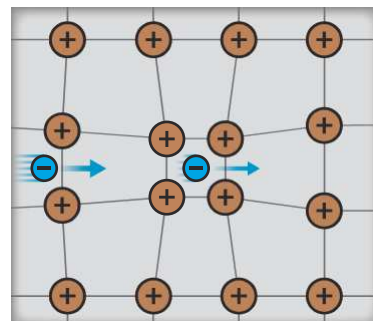
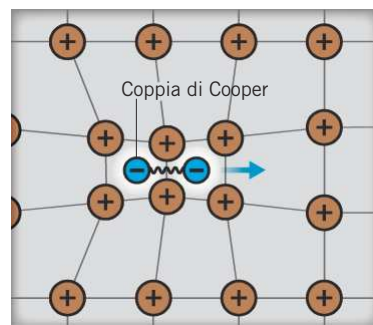
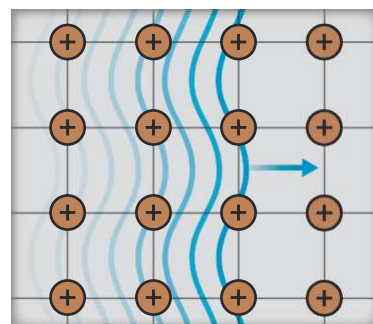
1 Quando un elettrone, dotato di carica negativa, si muove attraverso un reticolo di ioni carichi positivamente, gli ioni gli si avvicinano, deformando il reticolo.

2 La concentrazione risultante di carica positiva attira un altro elettrone verso il primo.

3 I due elettroni formano una connessione che ne fa un'unica entità, detta coppia di Cooper.

4 Innumerevoli coppie di Cooper si sincronizzano e si uniscono a formare un'onda gigantesca, nota come condensato di Bose-Einstein, così grande da poter passare senza ostacoli attraverso il reticolo.

Illustrazione di Jen Christiansen

Nel 2014, in Germania, i ricercatori di un gruppo diretto da Mikhail Eremets, a seguito di un'altra delle previsioni di Ma – che l'acido solfidrico (H_2S), il gas tossico emesso dalle uova marce, sarebbe un superconduttore a 80 kelvin sotto una pressione sufficiente – hanno compresso il gas puzzolente in un cella a incudini di diamante e hanno osservato con grande sorpresa che invece era supercondottore a 203 kelvin. Eremets aveva trovato per caso un altro composto superconduttore, H_3S, che deteneva il primato per l'alta temperatura prima della sintesi del LaH_{10}.

La ricerca di Hemley era diventata una gara. Nel 2017, con l'aiuto di Hanyu Liu, postdoc del gruppo di Ma, ha usato un algoritmo di ricerca di strutture per prevedere LaH_{10} e ha dato al suo gruppo le istruzioni che avrebbero portato alla sintesi di questo composto. Presto ci è riuscito anche Eremets; ha confermato il segnale dato dal calo di resistività e, più di recente, ha sottoposto il composto a una serie più completa di test per confermarne la compatibilità con la teoria BCS: i test hanno avuto esito positivo.

Queste scoperte uniscono elementi previsti e altri sorprendenti. Per esempio LaH_{10} è nato dal suggerimento di Hemley secondo cui Liu avrebbe dovuto concentrarsi sui composti con la maggior quantità possibile di atomi di idrogeno, per approssimare il più possibile l'idea originale di Ashcroft. D'altro canto, si ritiene che le prestazioni ad alta temperature di LaH_{10} derivino in parte dai modi vibrazionali della sua speciale struttura di clatrato, in cui gli atomi di idrogeno racchiudono un atomo di lantanio in una «gabbia», una configurazione che i teorici «non avrebbero mai previsto», afferma Eva Zurek, una chimica che svolge ricerche sulle strutture dei composti all'Università di Buffalo. Ma, fra previsioni e sorprese, i nuovi programmi hanno fatto improvvisamente acquisire anche ai teorici come Ma e Zurek un ruolo più importante per la ricerca nel campo dei superconduttori. «Penso che gli sperimentatori ci prendano molto più sul serio rispetto al passato», conferma Zurek.

Una classe sconosciuta di superconduttori potrebbe trovarsi nella frontiera senza fine della tavola periodica

Principi di progettazione

Che i fisici teorici abbiano accelerato la scoperta di H3S e LaH_{10}, superconduttori convenzionali a cui si applica la teoria BCS, è una cosa, ma il fatto più sorprendente è che potrebbero fare lo stesso per superconduttori non convenzionali, per i quali i fisici non hanno ancora una teoria che funzioni.

LaH_{10} non è stato l'unica grande notizia sulla superconduttività del 2018; l'altra è stata la scoperta dello stesso fenomeno nel grafene ruotato a doppio strato. Il grafene è un foglio di atomi di carbonio disposto in un reticolo esagonale, dello spessore di un singolo atomo. Il grafene a doppio strato è costituito da due di questi fogli, uno sopra l'altro, con i reticoli ruotati secondo un certo angolo. Nonostante la sua bassa temperatura critica, 1,7 kelvin, in questo materiale i legami delle coppie di Cooper sono insolitamente forti. La sua struttura semplice, composta da un solo elemento, ha suscitato la speranza di poterlo comprendere a fondo dal punto di vista teorico e di poter far luce sulla superconduttività non convenzionale in generale. È una scoperta a cavallo tra serendipity e previsione informatica: «È metà e metà», dice Pablo Jarillo-Herrero, capo del gruppo responsabile della scoperta al Massachusetts Institute of Technology. Il materiale superconduce solo a uno specifico angolo «magico» di torsione di 1,1 gradi, un valore che è emerso originariamente da un modello informatico. Però, sebbene i fisici teorici avessero previsto correttamente che questo angolo avrebbe prodotto un picco nelle interazioni elettrone-elettrone, non immaginavano che avrebbe portato alla superconduttività. È una sorpresa arrivata in laboratorio.

Questo risultato evidenzia il potenziale di quelli che Norman chiama principî di progettazione: qualità calcolabili che possono aiutare a prevedere la superconduttività pur in assenza di una teoria globale. Le prime cinque regole di Matthias erano di questo tipo, ma prima o poi ognuna ha trovato un'eccezione nel corso del lavoro sui superconduttori non convenzionali. Tuttavia, in un articolo del 2016 Norman ha sottolineato che anche i superconduttori non convenzionali di diverse classi mostrano somiglianze suggestive, tra cui molte caratteristiche dei rispettivi diagrammi di fase, che sono grafici che mostrano come cambiano le loro proprietà in funzione di variabili come pressione e temperatura. Ha anche osservato che le strutture a strati quasi bidimensionali, come i cuprati, sembrano sostenere temperature critiche elevate e che alcune strutture cristalline sembrano essere vantaggiose. Via via che emerge un numero sempre più grande di classi di superconduttori, ha spiegato, dovrebbero chiarirsi più principî di progettazione. Anche adesso, quando sono stati catalogati e caratterizzati oltre 12.000 materiali superconduttori, è ragionevole chiedersi se celati nei dati disponibili vi siano principî di progettazione utili e ancora da scoprire.

Gli algoritmi di apprendimento automatico sono programmi che modificano sé stessi via via che ricevono più dati. L'anno scorso uno di questi algoritmi, addestrato su una banca dati di migliaia di materiali, ha sviluppato la capacità di identificare i superconduttori (convenzionali e non convenzionali) in un altro insieme di dati con un'accuratezza del 92 per cento e di stimarne le temperature critiche. Addirittura, ci è riuscito usando solo proprietà fondamentali semplici come peso atomico e temperatura di fusione. Ma «la parte interessante non è il fatto che l'algoritmo di apprendimento automatico ci riesca – afferma l'autore principale dello studio, Valentin Stanev, dell'Università del Maryland – bensì come ci riesca. La scoperta è in quali predittori siano usati dalla macchina».

Stanev ha sottolineato che il principio di progettazione più importante trovato dall'algoritmo per le temperature critiche dei cuprati è un parametro (correlato al numero di elettroni nelle orbite più esterne degli atomi del composto) che, a quel che ne sa, non era mai stato notato. La speranza è che, via via che si identificano più predittori, li si possa applicare in forma aggregata per accelerare la ricerca di nuovi superconduttori sempre migliori.

Invece di contare sulla fortuna in laboratorio, afferma Stefano Curtarolo, coautore di Stanev e scienziato dei materiali alla Duke University, «l'apprendimento automatico suggerirà un sottoinsieme di composti da provare. Invece di testare in laboratorio dieci composti nel corso di un anno, gli sperimentatori ne testeranno 10.000 sul computer e ci metteranno solo poche settimane».

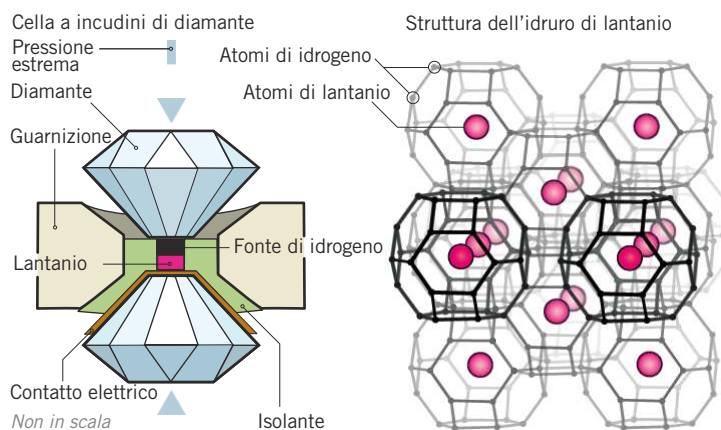
Un'arte oscura

Sebbene i fisici teorici abbiano iniziato a prevedere composti nuovi e interessanti, sono molto lontani dal poter dare istruzioni dettagliate per realizzarli in laboratorio. «A un certo punto qualcosa che fai funziona», dice Somayazulu, descrivendo il processo di sintesi dei materiali. «E continui a fare esattamente la stessa co-

SUPERCONDUTTORE AD ALTA TEMPERATURA

Idruro di lantanio

L'idruro di lantanio, o LaH_{10}, il superconduttore alla più alta temperatura oggi conosciuto, può funzionare a una temperatura sorprendentemente elevata, –8,3 gradi Celsius, e forse anche di più, sebbene a una pressione immane.
LaH_{10} è stato ottenuto nel 2017, usando una cosiddetta cella a incudini di diamante per comprimere idrogeno e lantanio.
Il materiale risultante contiene un reticolo di atomi di idrogeno che racchiude un singolo atomo di lantanio (*in rosa*) in una struttura simile a una gabbia, che sembra particolarmente favorevole alla superconduttività.

Fonte: *Synthesis and Stability of Lanthanum Superhydrides*, di Zachary M. Geballe e altri, in «Angewandte Chemie International Edition», Vol. 57, n. 3, 15 gennaio 2018 (*struttura idruro di lantanio*); illustrazione di Jen Christiansen

sa per farla funzionare, ma non hai idea del perché funzioni.» Per esempio, a Somayazulu ci sono voluti sei mesi per ripetere il test di superconduttività di LaH_{10} perché i ricercatori stavano ancora eliminando gli errori dal loro protocollo per creare il composto. Ma almeno hanno ottenuto LaH_{10}, il che non si può dire per CaH_6, un composto previsto nel 2012 dagli studi di Ma, che però sfugge ancora ai tentativi di sintetizzarlo. E l'ittrio? Non lo menzionate neppure a Somayazulu. L'idruro di ittrio (YH_{10}) dovrebbe essere superconduttore a temperature anche più elevate rispetto a LaH_{10}, ma il suo comportamento negli esperimenti di Somayazulu è stato «orribile». Il trucco con l'ammoniaca-borano, per esempio, non funziona, come non ha funzionato con il selenio ad alta pressione, sebbene abbia funzionato a basse pressioni. Ricordiamo anche che Eremets ha trovato H_3S mentre cercava H_2S. Chiaramente, la sintesi dei materiali è ancora un'arte oscura.

Anche la ricerca di strutture ha le sue difficoltà. «Per far partire gli algoritmi basta premere un pulsante», commenta Zurek. «Ma le analisi possono essere delicate, e non vorrei che a farle fosse un non esperto», aggiunge con una risatina. Un supercomputer impiega circa una settimana, in media, per completare una ricerca per una data stechiometria e pressione, e per una data coppia di elementi potrebbero essere interessanti molte possibili combinazioni. La pesantezza dei calcoli e la delicatezza dell'analisi limitano la maggior parte delle ricerche a composti di due soli elementi e con un numero non troppo elevato di atomi in una cella unitaria, il componente fondamentale di un cristallo. «Non sappiamo ancora prevedere in modo affidabile un sistema che abbia tre elementi e 50 atomi in una cella unitaria», afferma Zurek.

I programmi di apprendimento automatico, dal canto loro, non richiedono altrettanta potenza di calcolo; Stanev faceva girare il suo su un computer portatile. Il loro grande limite, e quello dei principî di progettazione in generale, è che possono solo basarsi sulle lezioni ricavabili dai superconduttori noti, il che rende improbabile che ne scoprano una nuova classe.

Per quanto riguarda LaH_{10} e gli altri idruri, a che cosa porteranno? Le opinioni variano. Hemley, che si è recentemente trasferito all'Università dell'Illinois a Chicago, spera che potremo trarne lezioni per creare un materiale «analogo» in grado di mantenere a pressione ambiente le proprietà superconduttrici ad alta temperatura. Littlewood non vede motivi per cui questo sia impossibile. Altri invece sono scettici, per via del ruolo fondamentale svolto finora dalla pressione nelle prestazioni degli idruri. «Possiamo permetterci un forte accoppiamento elettrone-fonone senza distruggere il cristallo – dice Mazin – solo perché è tenuto insieme da una pressione esterna».

Se un analogo di questo tipo è possibile, probabilmente sarà composto da almeno tre elementi, dice Zurek, e avrà una struttura cristallina complessa, secondo Mazin. Più in generale, l'andamento dei superconduttori a temperatura elevata sembra puntare verso materiali più complessi. I superconduttori a elemento singolo con temperature critiche a una cifra sono stati superati dalle leghe metalliche di Matthias, che sono state sorpassate da materiali con più elementi e strutture cristalline più complicate. Se, come ritengono molti esperti, la migliore speranza per il sogno della temperatura ambiente è una classe di superconduttori ancora sconosciuta, allora sembra probabile che si trovi nelle profondità della frontiera illimitata della tavola periodica.

Quanto a Somayazulu, è felice di essere sfuggito alla regola di Matthias contro i teorici. All'Argonne National Laboratory parlava appassionatamente dei tentativi falliti di produrre CaH_6, dei problemi nel corso degli esperimenti per produrlo e delle discussioni con i teorici strada facendo. A volte i teorici hanno insegnato qualcosa agli sperimentatori, altre volte il contrario. Per Somayazulu, è questa l'eredità più importante degli idruri: questo nuovo «circuito di interazione» tra esperimento e teoria. «Ogni volta che i teorici formulano una previsione, c'è una probabilità 50-50 che funzioni», dice. «Ma almeno adesso abbiamo questa probabilità del 50 per cento». ■

PER APPROFONDIRE

Superconductivity at 250 K in Lanthanum Hydride under High Pressures. Drozdov A.P. e altri, in «Nature», Vol. 569, pp. 528-531, 23 maggio 2019.

Evidence for Superconductivity above 260 K in Lanthanum Superhydride at Megabar Pressures. Somayazulu M. e altri, in «Physical Review Letters», Vol. 122, n. 2, articolo n. 027001, 14 gennaio 2019.

Viewpoint: Pushing towards Room-Temperature Superconductivity. Zurek E., in «Physics», Vol. 12, n. 1, gennaio 2019.

La primavera dei superconduttori. Canfield P.C. e Bud'ko S.L., in «Le Scienze» n. 442, giugno 2005.

Superconduttori a temperatura ambiente. Moyer M., in «Le Scienze» n. 504, agosto 2010.

MEDICINA

La ricetta di Darwin contro il cancro

Un nuovo approccio alle terapie oncologiche e alla prevenzione dei tumori si ispira ai principi dell'evoluzione e della selezione naturale

di James DeGregori e Robert Gatenby

Nel corso di quest'anno, almeno 31.000 pazienti negli Stati Uniti riceveranno una diagnosi di cancro alla prostata diffuso in altre parti del corpo, come ossa e linfonodi. La maggior parte di questi pazienti sarà seguita da oncologi esperti e altamente qualificati, che hanno accesso ai 52 farmaci approvati per curare questa patologia. Eppure, oltre tre quarti di questi pazienti finiranno per soccombere alla malattia.

I tumori che si sono diffusi nel corpo, noti come «metastatici», sono raramente curabili. Le ragioni per cui i pazienti muoiono anche dopo aver ricevuto cure efficaci sono molte, ma tutte si rifanno a un'idea resa famosa nel 1859 da Charles Darwin per spiegare l'ascesa e la caduta di specie di uccelli e di tartarughe. Oggi quell'idea è chiamata evoluzione.

Pensiamo a una cellula tumorale come a uno dei fringuelli delle Galápagos studiati da Darwin, che hanno becchi leggermente differenti sulle diverse isole. I fringuelli si nutrono di semi, e i semi di ogni isola hanno forme o caratteristiche differenti. L'uccello con la forma del becco più adatta al seme locale è quello in grado di procurarsi la maggior quantità di cibo e di procreare di più, generando discendenti con il medesimo becco, mentre gli uccelli con becchi meno adatti non sopravvivono. Questa selezione naturale ha assicurato l'evoluzione di specie differenti di fringuelli, con becchi diversi, su ciascuna isola. Il concetto chiave è che quando due gruppi di animali competono nello stesso spazio ristretto prevarrà la specie in grado di adattarsi maggiormente all'ambiente.

Le cellule tumorali si evolvono in modo simile. Nei tessuti sani, le cellule non tumorali proliferano perché si adattano perfettamente ai segnali biochimici di crescita, ai segnali fisici e ai nutrienti che ricevono dai tessuti sani circostanti. Se una mutazione genera una cellula tumorale che si adatta scarsamente ai tessuti circostanti, allora inizialmente quella cellula non avrà molte pos-

IN BREVE

Nella lotta contro il cancro, la medicina si concentra sulle mutazioni maligne all'interno delle cellule e prevede la somministrazione di dosi massicce di farmaci tossici nel tentativo di eliminare la malattia.

Una nuova impostazione sottolinea che lo sviluppo tumorale sia stimolato da modifiche all'esterno delle cellule, cioè da alterazioni nei tessuti circostanti che accelerano l'evoluzione dei tratti tumorali.

Questo approccio rivoluzionario, testato su animali e pazienti con cancro avanzato alla prostata, ostacola la selezione naturale delle cellule tumorali attraverso un uso più controllato della chemioterapia.

Illustrazione di Maria Corte

sibilità, perché le cellule sane prevarranno in termini di risorse. Se però i tessuti circostanti sono danneggiati da un'infiammazione (spesso causata dalla stessa cellula tumorale in fase di crescita) o dall'età avanzata, la cellula tumorale avrà maggiori possibilità, e inizierà a prevalere sulle cellule sane che in precedenza ne limitavano la crescita. In ultima analisi, il cambiamento dell'ambiente circostante determina il successo di una cellula tumorale.

Questa è una teoria che chiamiamo oncogenesi adattativa, e abbiamo trovato prove a suo favore nel modo in cui il cancro inizia a proliferare quando, in esperimenti su animali, abbiamo modificato il suo ambiente cellulare, sebbene il funzionamento interno delle cellule tumorali non abbia subito modifiche. I medici hanno osservato questa accelerazione anche in pazienti con patologie dei tessuti, come le malattie infiammatorie croniche intestinali. L'implicazione generale è che possiamo capire al meglio un tumore concentrandoci sul suo ambiente circostante invece di focalizzarci esclusivamente sulle mutazioni all'interno di una cellula. Riducendo le alterazioni dei tessuti provocate da processi come l'infiammazione, potremo ripristinare l'ambiente cellulare e (come dimostrato in vari studi su animali) evitare che le cellule tumorali acquisiscano un vantaggio sulle altre.

La nostra prospettiva evolutiva ha anche ispirato un approccio differente alle terapie per il cancro, che abbiamo testato con successo in piccoli trial clinici. I medici tendono a colpire i tumori con grandi quantità di farmaci chemioterapici, tentando di eliminarne ogni traccia, e all'inizio questa strategia sembra funzionare. Il tumore si riduce o scompare, poi però si ripresenta ed è resistente ai farmaci che in precedenza avevano ucciso queste cellule, proprio come gli insetti che distruggono le coltivazioni e sviluppano resistenza ai pesticidi. In un trial clinico su pazienti con tumore alla prostata uno di noi (Gatenby) ha adottato un approccio alternativo alla strategia della «terra bruciata», somministrando una dose di chemioterapia sufficiente a mantenere il tumore a dimensioni minime, però senza eliminarlo del tutto. L'obiettivo era conservare una piccola popolazione di cellule chemiosensibili e vulnerabili. Quella popolazione ha ottenuto buoni risultati nel contrastare la proliferazione di cellule con una caratteristica indesiderata: la chemioresistenza. In pazienti con cancro che tende a proliferare in modo incontrollato dopo 13 mesi, questo regime è riuscito a tenere sotto controllo i tumori per una media di 34 mesi con meno della metà della dose standard.

In base all'età, le stesse mutazioni cancerogene possono avere effetti diversi sul destino delle cellule

I risultati delle nostre strategie preventive e terapeutiche potrebbero portare a un nuovo metodo per tenere alla larga un tumore prima che diventi un pericolo e per salvare molti pazienti per i quali la somministrazione di dosi massicce di farmaco si è rivelata inefficace.

Perché ci ammaliamo di cancro?

Se chiediamo a qualsiasi medico o ricercatore oncologico «Perché l'invecchiamento, il fumo o l'esposizione alle radiazioni sono associati al rischio di cancro?», probabilmente riceveremo questa risposta sintetica: «Perché provocano mutazioni.» Questa valutazione è parzialmente vera: l'esposizione al fumo di sigaretta o alle radiazioni provoca effettivamente mutazioni nel nostro DNA, e le mutazioni si accumulano nelle nostre cellule per tutta la vita. Le mutazioni possono dare nuove proprietà alle cellule, per esempio segnali di crescita iperattivi per divisioni cellulari, tassi ridotti di morte cellulare o addirittura una migliore capacità di invadere i tessuti circostanti.

Eppure questa semplice spiegazione, che riguarda le modifiche che avvengono all'interno delle cellule, non considera che uno dei principali fattori dei cambiamenti evolutivi di ogni singola cellula (o di interi insiemi cellulari, come gli esseri umani) si trova all'esterno, nell'ambiente in cui vive la cellula.

Sappiamo che l'evoluzione delle specie sulla Terra è stata altamente dipendente da perturbazioni dell'ambiente, tra cui drastici cambiamenti che hanno riguardato masse continentali, gas contenuti nell'aria e nell'acqua e la temperatura ambientale. Queste modifiche hanno portato alla selezione di nuove caratteristiche adattative negli organismi, producendo una straordinaria diversità. Come Darwin scrisse in *L'origine delle specie* nel 1859: «In seguito a questa continua lotta per l'esistenza, ogni variazione, per piccola che sia e da qualsiasi cagione provenga purché sia in qualche parte vantaggiosa all'individuo di una specie, contribuirà nelle sue relazioni infinitamente complesse con gli altri esseri organizzati e con le condizioni fisiche della vita alla conservazione di quest'individuo e in generale si trasmetterà alla sua discendenza». Darwin propose che la competizione per risorse limitate guiderebbe la selezione di individui con tratti che meglio si adattano all'ambiente. E quando l'ambiente cambia, lo stesso accade per queste pressioni, portando così alla selezione di nuove caratteristiche che sono sintonizzate meglio con il nuovo ambiente.

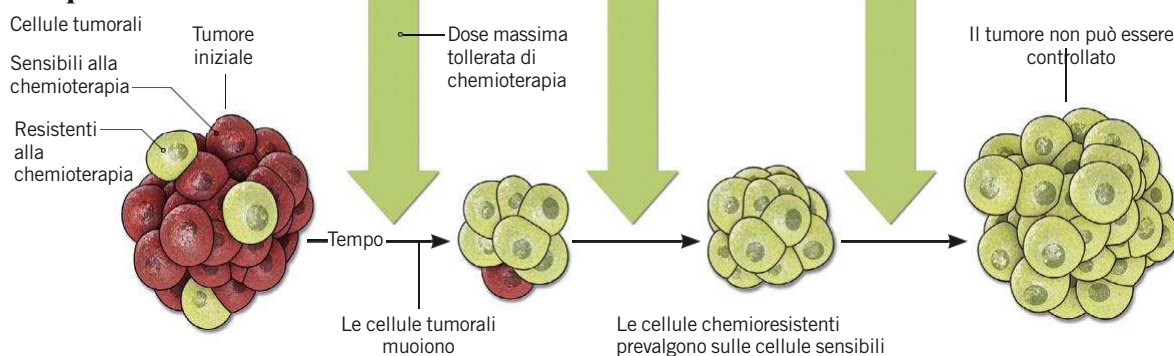
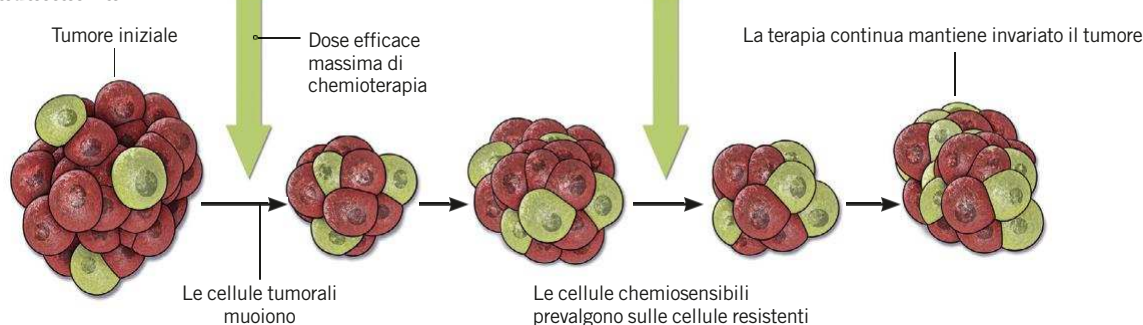
Simili dinamiche darwiniane dovrebbero essere applicate all'evoluzione del cancro nel nostro corpo. Pur essendoci formati come biologo molecolare (DeGregori) e come medico (Gatenvy), evoluzione ed ecologia ci hanno sempre affascinato. Le nostre numerose letture in questi ambiti, che inizialmente ritenevamo guidate solo dalla curiosità e non collegate al nostro lavoro quotidiano, hanno evidenziato analogie inaspettate tra le forze trainanti dell'evoluzione e le nostre osservazioni sullo sviluppo dei tumori e la risposta terapeutica nei pazienti. Per esempio, i ricercatori del settore sostengono che una mutazione cancerogena porti sempre un vantaggio alla cellula che la acquisisce. Noi invece abbiamo osservato l'azione di un classico principio dell'evoluzione: una mutazione non aiuta o compromette un organismo in modo automatico. Al contrario, i suoi effetti dipendono dalle caratteristiche dell'ambiente locale. Nei fringuelli di Darwin, non esiste un becco dalla forma «migliore» in assoluto; è vero però che alcu-

James DeGregori è professore di biochimica e genetica molecolare all'Anschutz Medical Campus dell'Università del Colorado. È autore del libro *Adaptive Oncogenesis: A New Understanding of How Cancer Evolves Inside Us* (Harvard University Press, 2018).

Robert Gatenby è medico, direttore del Dipartimento di radiologia del Moffitt Cancer Center di Tampa, in Florida, e membro del reparto di oncologia matematica integrata dello stesso dipartimento.

Tumori sotto controllo

In genere gli oncologi curano i tumori più aggressivi attaccandoli con forza. Colpiscono il tumore con la dose massima tollerata, cioè la quantità di farmaci antitumorali più elevata che un paziente riesce a tollerare. Poiché i farmaci colpiscono anche le cellule sane, i danni all'organismo del paziente sono l'unico limite reale per l'entità della dose e la durata della terapia. Ma alcune ricerche che studiano la crescita tumorale dal punto di vista evolutivo indicano che la strategia che mira a fare terra bruciata potrebbe essere una delle ragioni per cui i tumori si ripresentano e diventano letali. Tutte le cellule tumorali che sopravvivono all'assalto iniziale mostrano caratteristiche che le rendono resistenti al farmaco, e crescono in modo rapido nei tessuti devastati e saturi di farmaco. Un'alternativa chiamata terapia adattativa mira a usare dosi più basse, che prevengono la resistenza totale del tumore ai farmaci.

Alcuni test su pazienti con cancro alla prostata hanno dimostrato che il primo ciclo di cure riduce il tumore, ma permette ad alcune cellule sensibili al farmaco di sopravvivere. Queste cellule evitano che le loro rivali, quelle dotate di farmacoresistenza, prendano il controllo nel caso in cui il tumore si ripresenti. Poiché il tumore contiene queste cellule rimaste sensibili, un secondo ciclo di cure riesce a ridurre ulteriormente la dimensione della massa tumorale, con effetti simili nei cicli successivi.

ni becchi migliorano le probabilità di sopravvivenza degli uccelli in determinate condizioni. Abbiamo dedotto che una mutazione che attiva un gene cancerogeno (un cosiddetto oncogene) non rappresenta di per sé un vantaggio per la cellula, può anche essere svantaggiosa se rende la cellula meno capace di usare le risorse dei tessuti più vicini.

Un'altra fonte di ispirazione per il nostro lavoro è stata la teoria degli equilibri punteggiati proposta dai paleontologi Niles Eldredge e Stephen Jay Gould, i quali nella documentazione fossile hanno osservato che spesso le specie hanno mantenuto caratteristiche stabili per milioni di anni, per poi evolvere in modo rapido e improvviso in risposta a un drastico cambiamento ambientale. Questo concetto ha stimolato la nostra riflessione sul fatto che all'inizio alcuni tessuti potrebbero essere sfavorevoli alle mutazioni cellulari, ma cambiamenti in quegli stessi tessuti, come i danni e l'infiammazione nei polmoni di un fumatore, a volte potrebbero causare il cancro.

Abbiamo osservato questa dinamica per la prima volta in cambiamenti del midollo osseo che sono legati all'invecchiamento e portano allo sviluppo delle leucemie. Lavorando con topi giovani e anziani nel laboratorio di DeGregori in Colorado, Curtis Henry, della Emory University, e Andriy Marusyk, oggi al Moffitt Cancer Center, hanno riprodotto le stesse mutazioni cancerogene in cellule staminali del midollo di topi. I risultati hanno dimostrato che, in base all'età, le stesse mutazioni possono avere effetti diversi sul destino delle cellule: i cambiamenti promovevano la proliferazione di cellule mutate nei topi più vecchi ma non in quelli giovani.

E il fattore determinante non sembrava essere nelle cellule mutate ma nel metabolismo e nell'attività dei geni delle cellule sane che circondavano le cellule mutate. Per esempio, nelle cellule staminali non mutate del midollo osseo di topi anziani, l'attività di geni fondamentali per la divisione e la crescita delle staminali stesse era ridotta, ma tornava ai livelli standard quando veniva introdotta la mutazione cancerogena. Tuttavia, la mutazione che aiutava queste cellule provocava effetti negativi nei topi. Normalmente queste staminali svolgono un ruolo essenziale per il siste-

Illustrazione di Mesa Schumacher

ma immunitario, ma la proliferazione della loro versione mutata porta allo sviluppo di leucemie.

D'altra parte le giovani cellule staminali nei tessuti dei giovani topi avevano già livelli di crescita e di consumo energetico ben allineati con quello che il loro ambiente circostante poteva offrire. Di conseguenza, queste cellule non beneficiavano delle mutazioni cancerogene introdotte da noi sperimentatori e le popolazioni di cellule mutate non crescevano. Favorendo lo status quo, la giovane età rappresenta un fattore soppressivo per il tumore.

Perché è importante? Sebbene sia possibile prevenire alcune mutazioni non fumando ed evitando altre esposizioni mutagene, molte mutazioni, e non tutte, che accumuliamo nelle cellule nel corso della vita sono inevitabili. Tuttavia, questa nuova attenzione per gli ambienti dei tessuti introduce un modo per limitare il cancro: invertire le alterazioni ai tessuti provocate da invecchiamento, fumo e altre cause ridurrà le possibilità di successo delle mutazioni cancerogene. Le mutazioni si verificheranno comunque, ma avranno meno probabilità di favorire le cellule mutate, e di conseguenza il loro numero non aumenterà.

Naturalmente non c'è alcuna fonte della giovinezza per invertire oppure prevenire l'invecchiamento. Uno stile di vita corretto, tenendosi in esercizio, seguendo un'alimentazione equilibrata e non fumando, può favorire il mantenimento dei tessuti ed essere la migliore strategia a nostra disposizione, per il momento. Ma se riusciremo a capire quali fattori ambientali tissutali chiave favoriscono il cancro potremmo essere in grado di modificarli per limitare l'insorgere di tumori maligni. Nei nostri esperimenti sui topi abbiamo dimostrato che, quando abbiamo ridotto l'attività di proteine che causavano infiammazione e provocavano danni ai tessuti nei topi più anziani, le cellule con le mutazioni cancerogene non proliferavano e le cellule sane mantenevano il loro ruolo dominante. Tuttavia, dobbiamo procedere con cautela. Bloccare l'infiammazione in topi che vivono in gabbie sterili potrà anche ridurre il cancro, però una strategia simile in persone che vivono nel mondo reale potrebbe ridurre le difese contro le infezioni, perché l'infiammazione fa parte della nostra risposta immunitaria.

I medici hanno imparato una lezione simile con gli antibiotici, il cui uso eccessivo genera patogeni resistenti

Dalla prevenzione alla terapia

Insieme alla prevenzione primaria, la comprensione dei principi evolutivi può aiutare a migliorare l'efficacia delle terapie contro i tumori, riducendo la tendenza subdola di queste cellule a sviluppare resistenza ai farmaci. L'evoluzione della resistenza avviene secondo altre regole. Forse l'esempio più familiare è la secolare lotta tra agricoltori e insetti che distruggono le coltivazioni. Per oltre un secolo i produttori di pesticidi hanno assicurato un flusso costante di nuovi prodotti, ma gli insetti parassiti hanno continuato a sviluppare resistenza. Alla fine i produttori hanno capito che tentare di eliminare le infestazioni spruzzando grandi dosi di pesticidi sui campi peggiorava ulteriormente il problema, a causa di un processo evolutivo chiamato allentamento competitivo (o *competitive release*).

Per capire questo concetto pensiamo al fatto che tutti gli insetti appartenenti all'ampia popolazione che vive in un campo sono in costante competizione in termini di cibo e spazio, e non sono identici (lo stesso può dirsi per le cellule tumorali): per ogni singola proprietà, compresa la sensibilità a un pesticida, c'è un'inevitabile variabilità in una singola popolazione. Spruzzando una grande quantità di pesticida (o somministrando una dose massiccia di farmaco chemioterapico), l'agricoltore (o l'oncologo) potrebbe eliminare gran parte degli insetti (o delle cellule tumorali), ma alcuni di questi insetti avranno caratteristiche che li rendono meno sensibili ai pesticidi. Rimuovendo gli organismi più vulnerabili, i più resistenti cominceranno a diffondersi. Una strategia chiamata controllo integrato dei parassiti tenta di affrontare la situazione usando i pesticidi con moderazione. Invece di provare a eliminare i parassiti, gli agricoltori spruzzano una quantità appena sufficiente a controllarli e a ridurre il danno alle colture senza suscitare una competizione. In questo modo si mantiene la sensibilità degli insetti nocivi al pesticida.

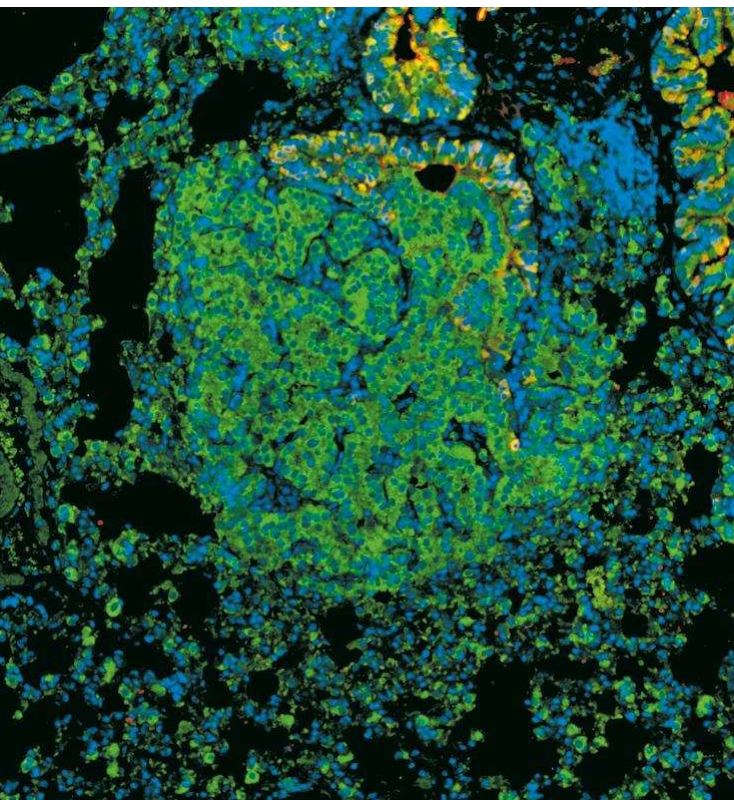
La comunità medica ha imparato una lezione simile con gli antibiotici, il cui uso eccessivo va limitato per mettere fine al costante ciclo evolutivo che favorisce lo sviluppo di patogeni farmacoresistenti. Ma questa lezione non ha ancora preso piede in ambito oncologico.

Come gli agricoltori che inondavano i campi con enormi quantità di pesticidi, oggi i medici tendono a somministrare i farmaci chemioterapici alla cosiddetta dose massima tollerata (DMT) fino «alla progressione della malattia». Quasi tutti questi farmaci danneggiano anche i tessuti sani nel corpo, e questi effetti collaterali possono essere molto spiacevoli o addirittura letali. La DMT indica che i farmaci sono somministrati in dosi al limite del mortale per il paziente, o poco prima di causare effetti collaterali intollerabili. L'idea di somministrare la stessa terapia fino alla progressione della malattia deriva da un parametro tradizionale di valutazione dell'esito clinico, basato sulla riduzione delle dimensioni del tumore. I farmaci sono considerati efficaci quando il tumore si riduce, e le terapie sono abbandonate se il cancro si ingrandisce. Per la maggior parte dei pazienti e dei medici, la strategia migliore consiste in terapie che puntano a uccidere il maggior numero possibile di cellule tumorali somministrando senza sosta la quantità massima possibile di farmaci letali. Tuttavia, come nella gestione degli insetti e delle malattie infettive, spesso questa strategia applicata a un cancro incurabile non ha molto senso dal punto di vista evolutivo, e in particolare rischia di scatenare una serie di eventi che accelerano la crescita di cellule resistenti ai farmaci.

La seconda lezione evolutiva appresa dal controllo integrato è che un «piano di gestione della resistenza» può tenere sotto controllo le popolazioni indesiderate, spesso per un tempo indefinito. Questa strategia può portare anche a risultati migliori per pazienti con tumori incurabili? La risposta non è ancora chiara, però ci sono indizi ottenuti da studi sperimentali e trial clinici che potrebbe accadere proprio questo.

Una strategia basata sull'evoluzione applicata a un paziente che, dopo un mese di farmaco anticancro, ha una riduzione del 50 per cento delle dimensioni del tumore potrebbe implicare l'interruzione del trattamento. Questo approccio verrebbe seguito solo quando le esperienze pregresse dimostrino che le cure disponibili (chemioterapia, terapia ormonale, chirurgia, stimolatori del sistema immunitario) non siano in grado curare il cancro nel paziente in questione. Poiché il tumore non è curabile, l'obiettivo sarebbe prevenirne la crescita e ritardarne l'evoluzione in metastasi il più a lungo possibile. Interrompendo la terapia, rimarrebbe

I tumori in fase iniziale, come quello ai polmoni (*in verde chiaro*), crescono perché sviluppano caratteristiche che permettono loro di prevalere sulle cellule sane.

Mounita Ghosh

un gran numero di cellule tumorali resistenti alle cure. Il tumore inizierebbe quindi a ricrescere e raggiungerebbe infine le sue dimensioni precedenti. Eppure durante questa fase di ricrescita, non ricevendo alcuna chemioterapia, la maggior parte delle cellule tumorali sarebbe ancora sensibile al farmaco anticancro, non resistente a esso. Di fatto, useremmo le cellule sensibili che siamo in grado di controllare per sopprimere la crescita delle cellule resistenti che non possiamo controllare. Di conseguenza, le terapie potrebbero mantenere il controllo sul tumore molto più a lungo rispetto all'approccio convenzionale basato sulla somministrazione continua della dose massima; e poiché la dose di farmaco sarebbe molto ridotta, avremmo una tossicità decisamente inferiore e una migliore qualità della vita.

Nel 2006 il gruppo di Gatenby ha iniziato a studiare questo approccio con modelli matematici e simulazioni al computer. Nonostante questi modelli fossero stati usati raramente nella pianificazione delle terapie oncologiche, l'ampia gamma di opzioni terapeutiche disponibili ci ha obbligato ad adottare un approccio, molto diffuso nell'ambito della fisica, in cui i risultati matematici contribuivano a definire metodi sperimentali con alte probabilità di successo. I nostri modelli hanno definito i livelli dei farmaci che volevamo testare. Poi quelle stesse dosi sono state provate su topi, e hanno confermato che strategie basate sull'evoluzione potrebbero migliorare notevolmente il controllo dei tumori.

I risultati sono stati abbastanza buoni da sollecitare un passaggio in ambito clinico e un test su pazienti con tumore. A questo scopo, ci siamo avvalsi della collaborazione di Jingsong Zhang, oncologo del Moffitt Cancer Center, specializzato nella cura del tumore alla prostata. Con Zhang abbiamo sviluppato un modello delle dinamiche evolutive delle cellule tumorali durante la terapia. Abbiamo usato il modello per simulare le risposte del cancro alla prostata a una serie di dosi di farmaci somministrate da un oncologo, fino a ottenere dosi che mantenevano sotto controllo il tumore per il periodo più lungo senza incrementare la popolazione delle cellule farmacoresistenti.

In seguito, abbiamo chiesto a pazienti con tumore alla prostata in forma aggressiva con metastasi in altre parti del corpo (quelle che i medici non riescono a eliminare completamente dall'organismo) di partecipare a un trial clinico. Finora i pazienti hanno ottenuto ottimi risultati. Dei 18 soggetti reclutati, 11 sono ancora in terapia. In genere la terapia convenzionale riesce a gestire il tumore metastatico alla prostata per circa 13 mesi. Nella nostra sperimentazione, la durata media è di almeno 34 mesi, e poiché oltre metà dei nostri pazienti è ancora in terapia, non siamo ancora in grado di stabilire il limite massimo. Inoltre, abbiamo ottenuto questi risultati somministrando solo il 40 per cento della dose di farmaco previsto dalle terapie standard. Questo approccio terapeutico è però alle prime fasi, e riguarda solo i pazienti con tumore specifico; non è detto, per esempio, che sia altrettanto efficace nei casi di tumore allo stomaco. Inoltre, potrebbe essere difficile convincere i pazienti, anche quelli con un tumore incurabile, che l'approccio migliore non consiste nell'uccidere il maggior numero possibile di cellule, bensì la minima quantità necessaria.

Le regole del cancro

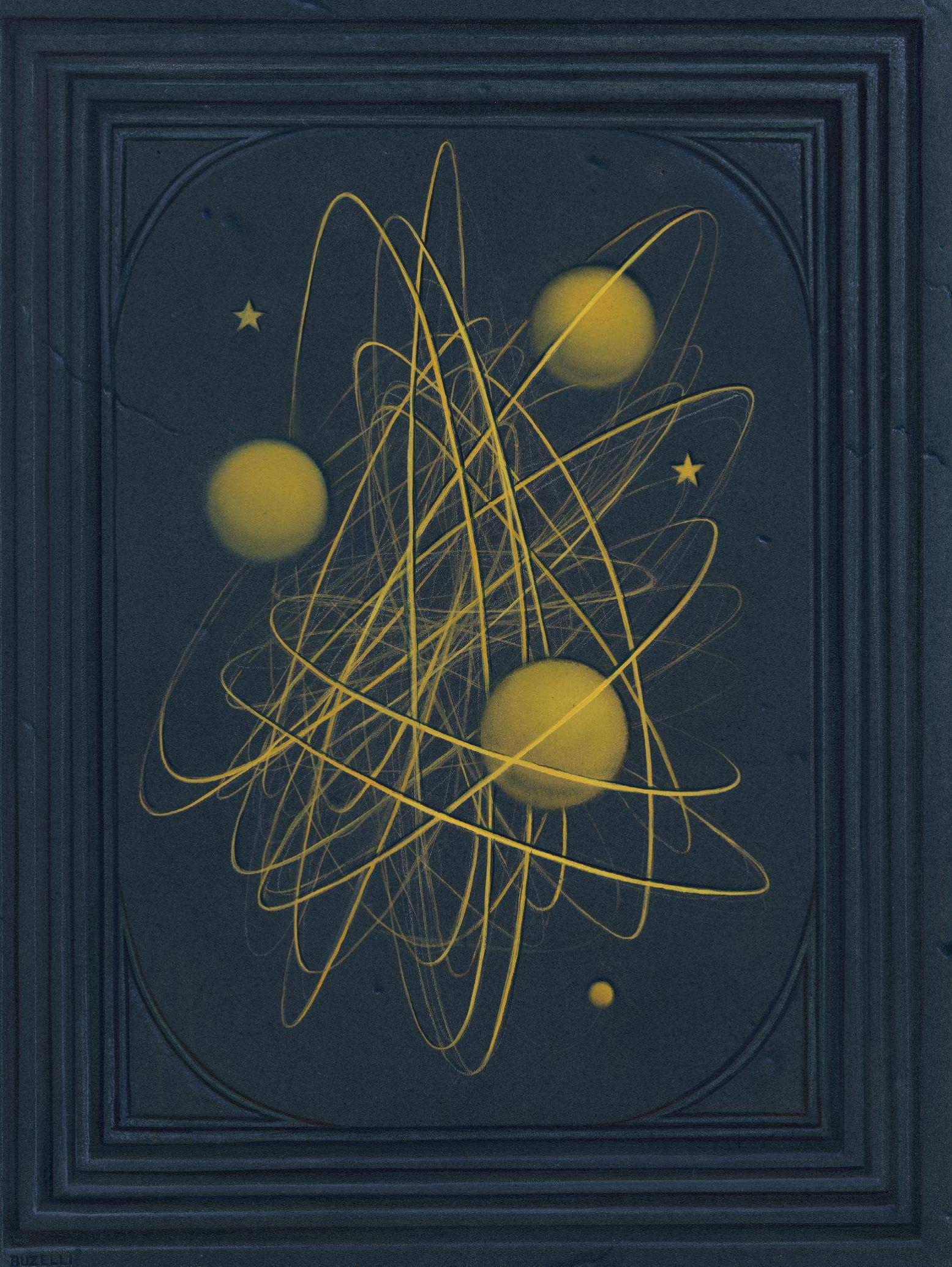
Per molti aspetti, il modello evolutivo dello sviluppo del tumore e della terapia per questa malattia ci aiuta a fugare il mistero che la riguarda. La sua tendenza a colpire senza una causa chiara, unita alla sua capacità di riemergere anche dopo la somministrazione di terapie assai efficaci e spesso altamente tossiche, può essere vista dai pazienti e dalle persone che li assistono come irrimediabilmente complicata e incredibilmente potente. Al contrario, capire che i tumori obbediscono alle leggi dell'evoluzione proprio come tutti gli altri sistemi viventi può darci fiducia sul fatto che abbiamo una possibilità di controllarli. Anche senza una cura, usando la nostra comprensione delle dinamiche evolutive, possiamo modificare le terapie in modo strategico per ottenere il miglior esito possibile. E le strategie di prevenzione possono essere orientate per creare ambienti tissutali nel corpo che favoriscano le cellule sane rispetto a quelle tumorali.

Per oltre un secolo la comunità scientifica dedita alla ricerca sul cancro si è concentrata sullo studio di farmaci in grado di eliminare tutte le cellule tumorali risparmiando quelle sane. Il cancro però ha sfruttato l'evoluzione per eludere quei farmaci. Ma anche noi possiamo sfruttare l'evoluzione: abbiamo l'opportunità di approfondire il lavoro di Darwin e dai suoi successori per sviluppare approcci più realistici sia per prevenire sia per controllare questa malattia mortale. ■

PER APPROFONDIRE

Integrating Evolutionary Dynamics into Treatment of Metastatic Castrate-Resistant Prostate Cancer. Zhang J., Cunningham J.J., Brown J.S. e Gatenby R.A., in «Nature Communications», Vol. 8, articolo n. 1816, 28 novembre 2017.

First Strike-Second Strike Strategies in Metastatic Cancer: Lessons from the Evolutionary Dynamics of Extinction. Gatenby R.A., Zhang J. e Brown J.S., in «Cancer Research», Vol. 79, pp. 1-4, 20 giugno 2019.

L'albero del cancro. Townsend J.P., in «Le Scienze» n. 598, giugno 2018.

Richard Montgomery è *distinguished professor* di matematica all'Università della California a Santa Cruz. Si occupa in particolare del problema degli *N* corpi e di geometria delle distribuzioni.

MATEMATICA

Il problema dei tre corpi

Sebbene i matematici sappiano che non potranno mai «risolvere» compiutamente questo enigma vecchio di secoli, affrontarne alcuni casi particolari ha portato a scoperte affascinanti

di Richard Montgomery

Nella primavera del 2014 avevo abbandonato quasi del tutto il problema dei tre corpi. Esaurite le idee, avevo cominciato a scrivere programmi sul mio computer portatile per generare e analizzare soluzioni approssimate. Questi tentativi non avrebbero mai veramente risolto il problema, però avrebbero potuto portare a materiale utile per trovare una risposta. La mia mancanza di esperienza nella programmazione e la conseguente impazienza avevano rallentato i progressi, facendone un'esperienza spiacevole per un matematico abituato alla carta e alla matita come me. Quindi avevo deciso di rivolgermi al mio vecchio amico Carles Simó, professore all'Università di Barcellona, per convincerlo ad aiutarmi nella mia goffa ricerca.

IN BREVE

Uno dei più vecchi enigmi della matematica e della fisica è il cosiddetto «problema dei tre corpi», il cui enunciato è: quali saranno le traiettorie future di tre corpi, reciprocamente attratti dalla gravità, se sono note le loro posizioni e velocità attuali?

Isaac Newton è stato il primo a porre questo problema nel XVII secolo, insieme al più semplice «problema dei due corpi». Per tre corpi si è scoperto successivamente che la domanda è praticamente non risolvibile: di fatto è impossibile trovare una formula per prevedere in modo esatto le loro orbite.

I matematici hanno comunque continuato ad affrontare il problema, scoprendo soluzioni interessanti in casi specifici. Studiando il problema dei tre corpi, infatti, sono stati scoperti nuovi affascinanti principi della matematica.

Illustrazione di Chris Buzelli

Quell'autunno ero andato in Spagna apposta per incontrare Simó. Aveva la reputazione di essere uno degli analisti numerici più fantasiosi e attenti tra quelli che si occupano di meccanica celeste. È anche un uomo diretto, che non perde tempo e dice le cose come stanno. Il primo pomeriggio che ho trascorso nel suo ufficio, dopo avergli spiegato il mio problema, mi ha fissato e mi ha chiesto: «Perché ci tieni tanto?».

La risposta risale alle origini del problema dei tre corpi. Isaac Newton pose e risolse il problema dei due corpi nei suoi *Principia*, pubblicati nel 1687. Si chiese: «Come si muoveranno due masse nello spazio se l'unica forza che agisce su di esse è la loro attrazione gravitazionale reciproca?» Newton formulò la questione in termini di soluzione di un sistema di equazioni differenziali, che descrivono il movimento futuro di un oggetto in base alla sua posizione e velocità attuali. Risolse completamente le equazioni nel caso di due corpi; le soluzioni, dette anche orbite, mostrano che ognuno degli oggetti si muove lungo una conica: una circonferenza, un'ellisse, una parabola o un'iperbole. Trovando tutte le possibili orbite, Newton ricavò le leggi del moto planetario formulate da Johannes Kepler, principi empirici pubblicati nel 1609 che sintetizzavano decenni di osservazioni astronomiche effettuate dal suo datore di lavoro, Tycho Brahe. La prima legge di Keplero afferma che ogni pianeta (o cometa) si muove lungo una conica in un cui fuoco c'è il Sole. Nelle soluzioni di Newton, però, i due corpi – il Sole e un pianeta – si muovono su due coniche distinte, con un fuoco in comune: il centro di massa dei due corpi. Il Sole ha una massa molto maggiore di ognuno dei pianeti, tanto che il centro di massa del sistema pianeta-Sole è all'interno del Sole stesso, molto vicino al centro di massa del Sole; quest'ultimo si muove a malapena, oscillando attorno al centro comune lungo un piccolo percorso ellittico.

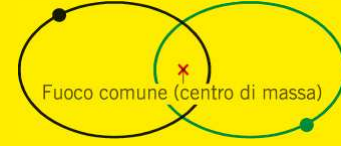
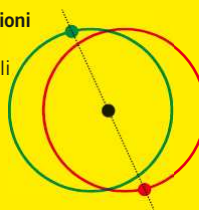
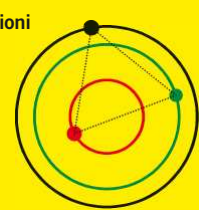
Se al posto delle due masse ne mettiamo tre, abbiamo il problema dei tre corpi. Come nel caso precedente, anche qui le orbite sono soluzioni di un sistema di equazioni differenziali. Tuttavia, a differenza del problema dei due corpi, qui è difficile trovare formule esplicite per le orbite. A oggi, nonostante i computer e i secoli di lavoro di alcuni dei migliori fisici e matematici, abbiamo formule esplicite solo per cinque famiglie di orbite, tre trovate da Leonhard Euler (nel 1767) e due da Joseph-Louis Lagrange (nel 1772). Nel 1890 Henri Poincaré scoprì che nel problema dei tre corpi si sviluppano dinamiche caotiche, una constatazione che implica

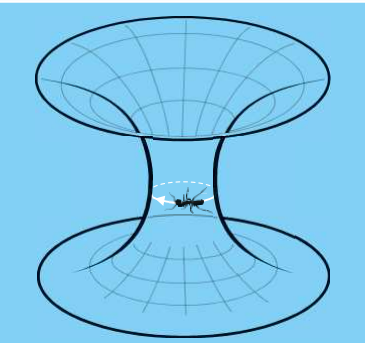
Due esempi di orbite di 2 corpi

La massa del Sole è molto maggiore di quella del pianeta: l'orbita ellittica del Sole è minuscola.

Orbita del Pianeta
Traiettoria seguita dal centro del Sole
Sole
Pianeta
Fuoco comune (centro di massa)

Due masse uguali in orbite ellittiche

Fuoco comune (centro di massa)

Due esempi di orbite di 3 corpi

Istante dell'eclisse

Catenoide

che non potremo mai conoscere tutte le soluzioni al problema con una precisione che si avvicini anche solo lontanamente alla soluzione completa di Newton per il problema dei due corpi. Eppure, grazie alla cosiddetta integrazione numerica, svolta con efficienza da un computer, possiamo comunque generare tratti di lunghezza finita di orbite approssimative, un processo essenziale per la pianificazione delle missioni spaziali. Concedendo più tempo al computer, possiamo far raggiungere alle approssimazioni la precisione che desideriamo.

Eclissi

La domanda di Simó mi aveva lasciato senza parole. «Certo che ci tengo», avevo pensato. «È un problema su cui lavoro da quasi vent'anni!». Per la precisione, mi ero concentrato su una particolare domanda all'interno del problema che mi interessava:

Ogni* successione *di eclissi periodica è la successione di eclissi di qualche soluzione periodica del problema planare di tre corpi?

Vediamo che cosa significa. Immaginiamo tre corpi – supponiamo che siano stelle o pianeti – che si muovono su un piano, attraendosi gravitazionalmente l'un l'altro. Chiamiamoli 1, 2 e 3. Di tanto in tanto saranno allineati tutti e tre su un'unica linea retta. Questi momenti sono una sorta di eclissi (tecnicamente, questa eclissi è chiamata «sizigia», una parola splendida per il gioco dell'impiccato, e ancor di più in inglese: *syzygy*). Via via che passa il tempo, registriamo ogni volta che si verifica una di queste eclissi, indicandola con 1, 2 o 3, a seconda di quale stella si trovi nella posizione centrale. In questo modo otteniamo un elenco di cifre 1, 2 e 3 che chiamiamo «successione di eclissi».

Per esempio, in una versione semplificata del nostro sistema Sole-Terra-Luna, la Luna (che chiameremo corpo «3») descrive una circonferenza attorno alla Terra (corpo «2») ogni mese, mentre la Terra ne descrive una intorno al Sole (corpo «1») una volta all'anno. Questo movimento si ripete periodicamente e quindi ci darà una successione periodica di eclissi, e precisamente: 2, 3, 2, 3, 2, 3, 2, 3, 2, 3, 2, 3, 2, 3, 2, 3, 2, 3, 2, 3, 2, 3, 2, 3. In questa successione non compare mai l'1 perché il Sole non si trova mai tra la Terra e la Luna. Per un anno l'elenco è composto da 24 numeri, con un «2, 3» per ciascuno dei 12 mesi.

A priori non c'è un motivo per cui la successione di eclissi di una soluzione debba ripetersi; potrebbe continuare all'infinito

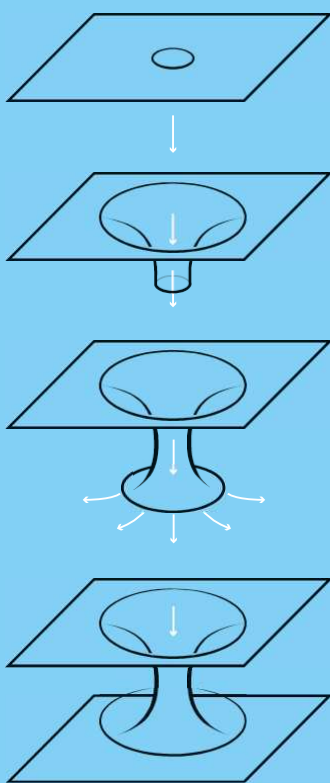
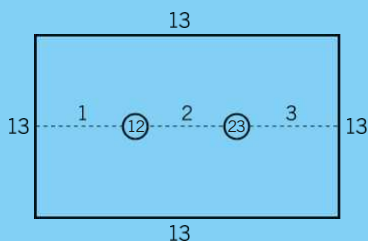
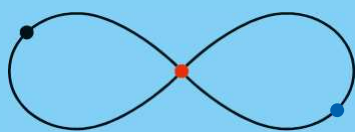
Illustrazioni di Nigel Hawtin

senza una struttura regolare. Se però la soluzione si ripete dopo un certo periodo di tempo, come succede per il sistema Terra-Luna-Sole dopo un anno, anche la successione si ripete: gli stessi 24 numeri del sistema Terra-Luna-Sole tornano ogni anno. Quindi, tornando alla mia domanda: ogni successione di eclissi periodica è la successione di eclissi di qualche soluzione periodica del problema planare dei tre corpi? Sospettavo che la risposta fosse affermativa, ma non riuscivo a dimostrarlo.

Oggetti bucati

Per giustificare l'importanza di questa domanda, ho ricordato a Simó un fatto fondamentale che lega tre rami della matematica: la topologia, a volte definita come geometria delle superfici deformabili; la geometria riemanniana, cioè lo studio delle superfici curve; e la dinamica, lo studio di come si muovono le cose. Immaginiamo un insetto che cammini sulla superficie curva detta catenoide (che qualche volta si usa per rappresentare un «wormhole»). L'insetto vuole trovare il cammino chiuso più corto che passi una volta attorno al buco. Dal punto di vista della topologia, la superficie del wormhole è uguale al piano x-y con un singolo forellino. Infatti, se immaginiamo un foglio di gomma flessibile con un buco, se spingiamo il buco verso il basso e lo dilatiamo verso l'esterno, possiamo ottenere la superficie del wormhole. Se il buco è stato allargato a sufficienza, non solo questo circuito di lunghezza minima esiste, ma soddisfa un'equazione differenziale molto simile alle equazioni dei tre corpi. Il nostro insetto avrebbe trovato così una soluzione periodica di un'equazione differenziale interessante.

Nel problema dei tre corpi il ruolo della superficie del wormhole è svolto da un oggetto chiamato spazio delle configurazioni, uno spazio i cui punti codificano le posizioni di tutti e tre i corpi simultaneamente, cosicché una curva nello spazio delle configurazioni specifica i movimenti di ciascuno dei tre corpi. Per imporre la condizione che i nostri corpi non entrino in collisione tra loro, pratichiamo dei buchi in questo spazio delle configurazioni. Come vedremo, dal punto di vista della topologia lo spazio delle configurazioni privo di collisioni che otteniamo in questo modo è fatto come un piano x-y con due fori. Etichettiamo i buchi con «12», per indicare che i corpi 1 e 2 si sono scontrati, e «23», corrispondente a una collisione di 2 e 3, e disponiamo i buchi sull'asse delle x. Disponiamo anche un terzo buco all'infinito e lo etichettiamo «13» per rappresentare una

La geometria delle superfici deformabili

Spazio delle configurazioni senza collisioni

Soluzione a 8

collisione dei corpi 1 e 3. Questi buchi dividono l'asse delle x in tre parti etichettate 1, 2 e 3. Una curva in questo piano con due fori rappresenta un movimento di tutti e tre i corpi, cioè una potenziale soluzione al problema dei tre corpi. Quando la curva attraversa il tratto 1 significa che si è verificata un'eclissi di tipo 1, e analogamente per gli attraversamenti dei tratti 2 o 3. Così, una successione di eclissi corrisponde a un percorso che passa attorno ai nostri buchi delle collisioni.

Ora, il nostro insetto cercava di minimizzare la lunghezza del suo percorso mentre girava intorno al wormhole. Per ottenere l'analogia corretta tra il problema dell'insetto e quello dei tre corpi, dobbiamo sostituire la lunghezza di un percorso con una quantità chiamata azione lungo un percorso. L'azione è una sorta di media dell'energia cinetica istantanea meno l'energia potenziale del movimento rappresentato dal percorso. Un teorema della meccanica vecchio di secoli ci dice che se una curva nello spazio delle configurazioni minimizza l'azione, deve essere una soluzione del problema dei tre corpi. Possiamo così provare a risolvere il nostro problema sulle successioni di eclissi cercando, tra tutti i percorsi chiusi che producono una data successione di eclissi, quei percorsi chiusi che minimizzano l'azione.

Questa strategia, che cerca di minimizzare l'azione nello spazio delle configurazioni per i circuiti che hanno una specifica successione di eclissi, mi aveva occupato per quasi 17 anni, portando a molti buoni risultati. Per esempio, nel 2000 Alain Chenciner dell'Université Paris Diderot e io abbiamo riscoperto quella che sembra essere la prima soluzione periodica nota del problema dei tre corpi con momento angolare nullo. Era una soluzione a forma di 8 trovata per la prima volta da Cris Moore del Santa Fe Institute nel 1993. Qui tre masse uguali si rincorrono a vicenda su un piano seguendo una traiettoria a forma di 8. La sua successione di eclissi è 123123, ripetuta per sempre. Il nostro lavoro ha reso popolare l'«8», ne ha fornito una dimostrazione rigorosa di esistenza e ha portato anche a un'esplosione di scoperte di molte nuove orbite per il problema degli N corpi di uguale massa, orbite battezzate «coreografie» da Simó, che ha scoperto centinaia di queste nuove famiglie di orbite. La nostra orbita a 8 è addirittura comparsa nel vendutissimo romanzo di fantascienza dell'autore cinese Liu Cixin, intitolato in italiano proprio *Il problema dei tre corpi* (Mondadori, 2017)

La mattina dopo aver esposto le mie meditazioni a Simó, mi ha detto una cosa che mi ha colpito. «Richard, se quello che pensi

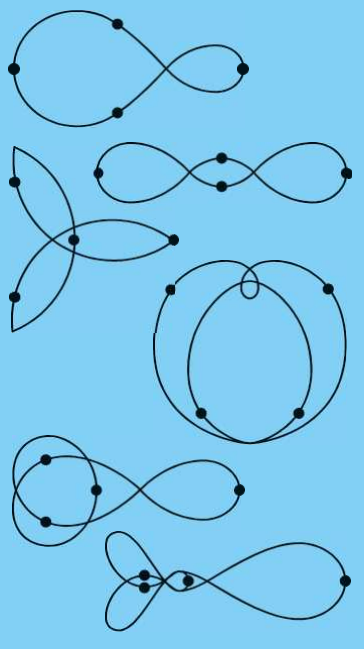
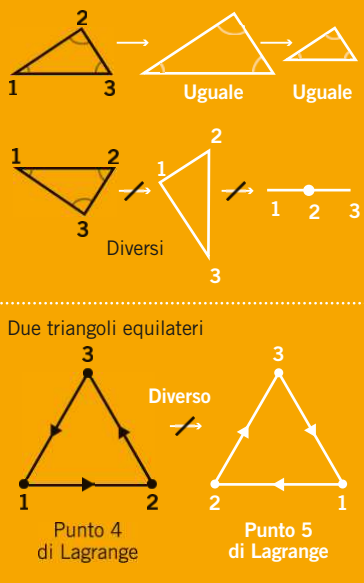
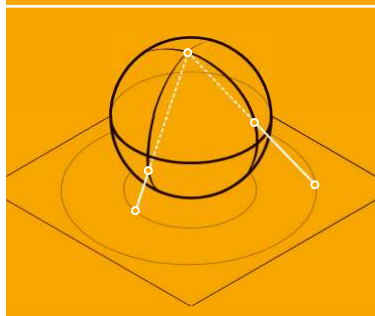
del tuo problema è vero, allora ci deve essere un meccanismo dinamico.» In altre parole, se avevo ragione nel dire che la risposta alla mia domanda era sì, allora la causa doveva essere in qualcosa di specifico nel modo in cui si muovono questi corpi.

Quelle poche parole mi hanno fatto dubitare delle mie convinzioni e mi hanno portato ad abbandonare il mio tentativo durato 17 anni di rispondere alla mia domanda minimizzando l'azione dei percorsi. Ho iniziato a chiedermi che cosa capivo dei meccanismi dinamici del problema. Me ne venivano in mente due possibili, di cui solo uno lasciava speranza. Questo meccanismo, collegato al caos scoperto da Poincaré, mi ha portato a riflettere sui vecchi lavori di un mio recente collaboratore, Rick Moeckel, dell'Università del Minnesota. Negli anni ottanta aveva mostrato come le curve chiamate «grovigli (o *tangle*) iperbolici», nate da collisioni triple nel problema dei tre corpi, possano portare a risultati sbalorditivi. Mentre rileggevo i suoi articoli, mi sembrava che Moeckel avesse la chiave del mio problema. L'ho contattato e in pochi giorni Moeckel e io avevamo risposto alla mia domanda... O quasi. Avevamo risposto a una domanda infinitamente vicina.

La sfera delle forme

Per capire il meccanismo dinamico di Moeckel e la relazione tra lo spazio delle configurazioni per i tre corpi e il piano con due buchi di cui abbiamo parlato, dobbiamo pensare a un oggetto chiamato «sfera delle forme». Mentre i tre corpi si muovono nel piano, in ogni istante formano i tre vertici di un triangolo. Invece di tenere traccia della posizione di ciascun vertice, consideriamo solo la forma complessiva del triangolo. Il risultato è una curva sulla sfera delle forme, che è una sfera i cui punti rappresentano appunto possibili «forme» di triangoli.

Che cos'è una «forma»? Due figure nel piano hanno la stessa forma se possiamo trasformare una figura nell'altra spostandola, ruotandola o cambiandone le dimensioni. Nell'operazione con cui passiamo dal consueto spazio delle configurazioni per tre corpi – in cui conosciamo le posizioni dei tre vertici di un triangolo – a un punto nella sfera delle forme, dimentichiamo qualcosa: dimensioni del triangolo, posizione del suo centro di massa e suo orientamento nel piano. Che la sfera delle forme sia bidimensionale è facile da capire dalla geometria che si studia a scuola: per conoscere la forma di un triangolo ne dobbiamo conoscere i tre angoli interni, ma poiché la somma degli angoli è sempre di 180°, ci bastano solo due dei tre

Nuove orbite

Forme

Proiezione stereografica

angoli, quindi due numeri sono sufficienti per descrivere la forma di un triangolo. Che la sfera delle forme sia proprio una sfera è meno evidente: dobbiamo ammettere anche i triangoli cosiddetti degeneri, quelli i cui tre vertici sono su una stessa retta. Questi triangoli degeneri, di area zero, formano l'equatore della sfera delle forme: sono le eclissi!

L'area di un triangolo divisa per r al quadrato (dove r è un parametro associato alle dimensioni lineari del triangolo: formalmente la radice quadrata del suo momento di inerzia) è la sua distanza dall'equatore. I poli nord e sud della sfera rappresentano i triangoli di area massima possibile e sono quindi equilateri. Ma perché ce ne sono due? Queste due forme triangolari equilatere differiscono per l'ordinamento ciclico dei loro vertici. Non è possibile trasformare uno di questi triangoli equilateri nell'altro con una rotazione, una traslazione o una variazione di scala nel piano: rappresentano forme diverse. Una riflessione speculare rispetto a una qualsiasi retta del piano, invece, trasforma una di queste forme triangolari equilatere nell'altra. Questa operazione di riflessione agisce su tutti i triangoli, e quindi sull'intera sfera delle forme: abbiamo una riflessione rispetto all'equatore, che mantiene fissi i punti dell'equatore (i triangoli degeneri) mentre scambia tra loro gli emisferi nord e sud.

Tra i triangoli degeneri ci sono le collisioni binarie: quei «triangoli» per i quali due dei tre vertici coincidono. Esistono esattamente tre di questi triangoli di collisione binaria, contrassegnati con «12», «23» e «13», a seconda di quali due vertici coincidono.

Ora posso spiegare come la sfera delle forme ci mostra che lo spazio delle configurazioni per tre corpi è topologicamente uguale al piano x-y meno due punti. Bisogna sapere che la sfera a cui sia stato tolto un solo punto è topologicamente lo stesso oggetto del solito piano x-y. Un modo per vedere questa proprietà della sfera consiste nell'usare la proiezione stereografica, che mappa la sfera privata di un singolo punto (la «sorgente di luce») sul piano x-y. Al tendere di un punto della sfera verso la sorgente di luce, la sua immagine sul piano x-y si sposta verso l'infinito; quindi possiamo anche dire che il piano a cui sia stato aggiunto un punto all'infinito è topologicamente equivalente alla sfera. Prendiamo come sorgente luminosa il punto di collisione binaria «13» della sfera delle forme, cosicché il punto all'infinito del piano x-y corrisponderà a questo punto «13». Orientiamo la sfera in modo che il suo piano equatoriale incontri l'asse x del piano x-y. Quindi la proiezione stereografica fa corri-

spondere l'equatore composto dai triangoli degeneri con l'asse x del piano; gli altri due punti di collisione binaria sono quindi mappati su due punti su questo asse. Così arriviamo alla figura descritta in precedenza.

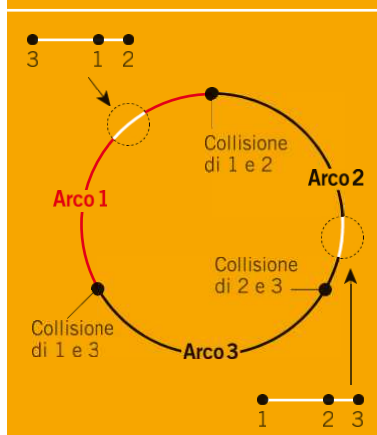
I tre punti di collisione binaria formano tre punti speciali sulla sfera delle forme. Oltre a questi tre, ci sono altri punti speciali sulla sfera delle forme, le cosiddette configurazioni centrali. Queste cinque configurazioni centrali corrispondono alle cinque famiglie di soluzioni scoperte da Euler e Lagrange. Sono le uniche soluzioni al problema dei tre corpi per le quali la forma del triangolo non cambia durante l'evoluzione del triangolo. Nelle soluzioni di Lagrange, il triangolo rimane equilatero in ogni istante; ci sono due configurazioni di Lagrange, come abbiamo visto, e formano i poli nord e sud della sfera delle forme. Li etichettiamo «punto 4 di Lagrange» e «punto 5 di Lagrange». Le restanti tre configurazioni centrali sono quelle di Eulero, etichettate come «punto 1 di Eulero», «punto 2 di Eulero» e «punto 3 di Eulero». Sono configurazioni collineari (cioè con i punti allineati) degeneri, e quindi si trovano sull'equatore della sfera delle forme. Sull'equatore si trovano tra i tre punti di collisione binaria. (La loro precisa disposizione lungo l'equatore dipende dai rapporti tra le masse dei tre corpi.) Il punto 1 di Eulero, per esempio, si trova sull'arco equatoriale contrassegnato con 1 e quindi è una forma collineare in cui il corpo 1 si trova tra i corpi 2 e 3. (Spesso tutti e cinque i punti di configurazione centrale sono chiamati punti di Lagrange: i punti di Eulero sono etichettati «L1», «L2» e «L3».)

Per capire le soluzioni di configurazione centrale possiamo immaginare di «lasciar andare» i tre corpi, cioè farli partire immobili, senza una velocità iniziale, e vedere come si muovono. In genere, quando si fa così, accadono cose pazzesche: collisioni binarie sfiorate, danze selvagge e magari uno dei corpi che sfugge all'infinito. Ma se lasciamo andare i tre corpi quando si trovano in una delle cinque forme di configurazione centrale, il triangolo che formano si riduce semplicemente a un punto, mantenendo la forma iniziale, con le tre masse che si attraggono uniformemente fino a quando la soluzione termina in una tripla collisione simultanea.

Le cinque strade verso la collisione tripla

La collisione tripla è una singolarità essenziale nel problema dei tre corpi, qualcosa come un big bang al centro del problema, ed è la fonte di gran parte del suo caos e della

La sfera delle forme

Punti di collisione binaria ed eclissi

sua difficoltà. All'inizio del Novecento il matematico finlandese Karl Sundman dimostrò che le cinque configurazioni centrali rappresentate dalle soluzioni «lasciate andare» che abbiamo visto sono le uniche che portano a collisioni triple. Quindi qualsiasi soluzione che finisce in una collisione tripla deve avvicinarcisi in un modo molto vicino a una di queste cinque soluzioni di configurazione centrale lasciate andare; via via che tende verso una collisione tripla, la forma della soluzione deve avvicinarsi a una delle cinque forme di configurazione centrale.

Il lavoro di Sundman fu una complicata impresa di algebra e analisi. Poi, l'anno in cui mi sono diplomato (quando ero ancora ignaro del problema dei tre corpi), il matematico statunitense Richard McGehee inventò il suo cosiddetto metodo del *blow-up*, che ci ha permesso di capire il lavoro di Sundman in modo visivo e di studiare in modo molto più dettagliato la dinamica vicino alla collisione tripla. Sia r la distanza dalla collisione tripla, una misura della dimensione complessiva di un triangolo. Via via che r si avvicina a zero, le equazioni di Newton cominciano a comportarsi sempre peggio, con molti termini che vanno all'infinito. McGehee ha trovato un cambiamento delle variabili dello spazio delle configurazioni e del tempo che rallenta l'avvicinamento alla collisione tripla e trasforma il punto triplo di collisione, corrispondente a $r = 0$, in un intero insieme di punti: la varietà di collisione. Sorpresa! La varietà di collisione è essenzialmente la sfera delle forme. Il metodo di McGehee ha esteso le equazioni di Newton, originariamente valide solo per r maggiore di zero, a un sistema di equazioni differenziali che ha senso quando $r = 0$.

Le equazioni di Newton non hanno punti di equilibrio, il che significa che non ci sono configurazioni in cui i tre corpi stiano fermi: tre stelle che si attraggono a vicenda non possono semplicemente rimanere nello spazio senza muoversi. Ma quando le equazioni di Newton vengono estese alla varietà di collisione appaiono punti di equilibrio. Ce ne sono esattamente dieci, una coppia per ciascuno dei cinque punti di configurazione centrale sulla sfera delle forme. Un elemento di ogni coppia rappresenta il risultato finale della corrispondente configurazione centrale lasciata andare mentre si avvicina alla collisione tripla. Le equazioni di Newton rimangono uguali anche se facciamo scorrere il tempo all'indietro; quindi possiamo far evolvere qualsiasi soluzione al contrario e ottenerne un'altra. Quando seguiamo all'indietro una soluzione di configurazione cen-

trale lasciata andare, otteniamo una soluzione che esplode in fuori dalla collisione tripla, raggiungendo la sua dimensione massima al momento della configurazione lasciata andare. L'altro elemento della coppia rappresenta il punto di partenza iniziale di questa soluzione «esplosiva». Prese insieme, queste due soluzioni di configurazione centrale – collisione ed eiezione – si adattano perfettamente e formano un'unica soluzione di eiezione e collisione che esce dal punto di equilibrio di eiezione a $r = 0$, entra nella regione con r maggiore di zero dove raggiunge una dimensione massima e poi si richiude nuovamente su se stessa per finire sulla varietà di collisione tripla, nel suo punto di equilibrio di collisione. Questa soluzione completa collega un elemento di una coppia di equilibri all'altro.

Creando questi punti di equilibrio associati alle configurazioni centrali, nascosti nelle profondità del problema dei tre corpi, McGehee diede a Moeckel una chiave che gli permise di applicare alcuni recenti risultati sui moderni sistemi dinamici – risultati che Newton, Lagrange o Sundman non potevano conoscere – per fare interessanti progressi sul problema dei tre corpi.

La passeggiata di Moeckel

Negli articoli di Moeckel ho visto un'immagine di un grafo i cui cinque vertici erano etichettati con le configurazioni centrali e uniti da archi.

Una passeggiata su un grafo è un circuito composto da vertici adiacenti, cioè uniti da archi a due a due. Moeckel ha dimostrato che ogni possibile passeggiata sul suo grafo corrisponde a una soluzione al problema dei tre corpi che si avvicina per qualche tempo alla soluzione di configurazione centrale etichettata dal vertice corrispondente. Per esempio, la passeggiata E1 L4 E2 L5 corrisponde a una soluzione molto vicina alla soluzione di eiezione-collisione associata al punto 1 di Eulero, poi si avvicina a una collisione tripla quasi lungo la soluzione di configurazione centrale di Lagrange L4, ma prima della vera e propria collisione tripla i tre corpi partono lungo una delle cinque «strade» molto vicine alla soluzione di configurazione centrale del punto 2 di Eulero. Infine, mentre questa soluzione di Eulero collassa di nuovo verso una tripla collisione, la soluzione si lancia in una forma equilatera di Lagrange L5. Inoltre, se ripetiamo questa stessa passeggiata, rendendola periodica, la soluzione che la seguirà sarà periodica.

Il grafo di Moeckel

Il grafo di Moeckel, immerso

Poco dopo che Simó mi disse che doveva esserci un meccanismo dinamico, mi resi conto che il grafo di Moeckel si immerge nella sfera delle forme. La cosa importante di questo grafo immerso è che ha in sé tutta la topologia della sfera con i suoi tre buchi di collisione binaria. Possiamo deformare la sfera perforata tre volte fino a farla coincidere con il grafo e così facendo trasformare ogni cammino chiuso sulla sfera bucata in una passeggiata sul grafo. Per vedere questa deformazione, immaginiamo che la sfera sia la superficie di un palloncino. Facciamoci tre forellini, uno per ogni buco corrispondente a una collisione binaria. Il palloncino è fatto di un materiale molto flessibile, cosicché possiamo dilatare i nostri tre forellini, allargandoli finché i bordi delle tre aperture quasi si toccano e il materiale rimanente forma un nastro stretto lungo il grafo immerso. Mentre si svolge questa deformazione, un qualsiasi circuito chiuso sulla sfera con i tre fori si deforma a diventare un circuito su questa struttura a nastro e, di qui, una passeggiata sul grafo immerso di Moeckel.

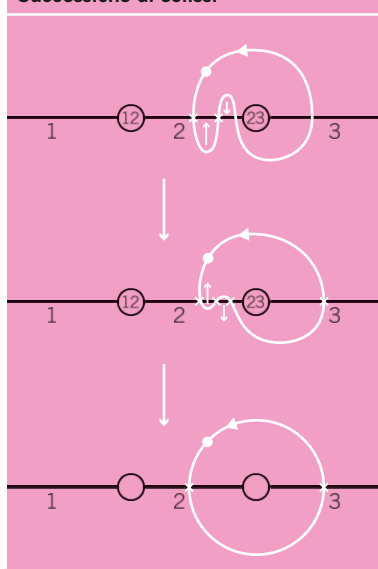
Per trasformare questa immagine in un teorema sulle soluzioni, dovevo dimostrare che se si proiettano le soluzioni garantite dal teorema di Moeckel sulla sfera delle forme non si allontanano mai troppo da questo grafo immerso. Se si allontanassero, potrebbero girare attorno alle collisioni binarie o addirittura colpirne una, eliminando o aggiungendo qualche circuito topologicamente significativo e quindi modificando la successione di eclissi. Ho scritto un'e-mail a Moeckel per chiedergli aiuto, e lui mi ha risposto: «Vuoi dire che devo rileggere gli articoli che ho scritto più di vent'anni fa?». Però lo ha fatto: è tornato alle sue vecchie ricerche e ha dimostrato che le proiezioni delle soluzioni che aveva codificato simbolicamente tanto tempo prima non si allontanavano mai dal grafo immerso. La mia domanda aveva trovato una risposta. O quasi.

Affinché la sua dimostrazione funzionasse, Moeckel aveva bisogno di un minimo di momento angolare. (Il momento angolare, in questo contesto, è una misura della quantità totale di «rotazione» di un sistema ed è costante per ogni soluzione.) Per quei 17 anni prima della mia conversazione con Simó, però, mi ero limitato a soluzioni che avessero un momento angolare nullo, perché le soluzioni che minimizzano l'azione tra tutte le curve che hanno una determinata successione di eclissi devono avere momento angolare pari a zero. D'altra parte, Moeckel aveva bisogno di una piccola quantità di momento angolare per far sì che le soluzioni si muovessero lungo gli archi del suo grafo. Nell'analisi matematica, il simbolo di una piccola

quantità positiva è un epsilon (ε). Avevamo bisogno di un ε di momento angolare.

C'è un altro problemino con i risultati di Moeckel: le sue soluzioni, quando attraversano l'equatore della sfera delle forme vicino ai punti di Eulero E1, E2 ed E3, oscillano avanti e indietro dalle due parti dell'equatore prima di dirigersi verso il polo nord o sud avvicinandosi alla quasi collisione tripla lungo la corrispondente strada di Lagrange, L4 o L5. Per tenere conto di queste oscillazioni, prendiamo un intero positivo N e chiamiamo una successione di eclissi «N-lunga» se ogni volta che nella successione compare un numero compare almeno N volte di seguito. Per esempio, la successione 1112222333332222 è 3-lunga, ma non è 4-lunga, perché ci sono solo tre 1 di fila.

Ecco, finalmente, il nostro teorema principale: consideriamo il problema dei tre corpi con un piccolo momento angolare ε diverso da zero e con le masse all'interno di un ampio intervallo aperto. Allora esiste un numero intero positivo grande N con il seguente significato. Se scegliamo una successione di eclissi in qualunque modo, purché sia N-lunga, allora esiste una soluzione corrispondente al nostro problema dei tre corpi che ha precisamente quella successione di eclissi. Se la successione è periodica, allora lo è anche la soluzione che la realizza.

E la mia domanda originale? Non menzionava nessun valore grande N; chiedeva qualcosa su qualsiasi successione di eclissi. In realtà non vi ho detto la mia vera domanda. Quello che volevo sapere davvero era se potevo realizzare o meno qualsiasi «tipo topologico» di curva periodica, non qualsiasi successione di eclissi. Usavo la successione di eclissi come maniera comoda per descrivere il tipo topologico, cioè come modo per codificare come si avvolge il nostro circuito attorno ai tre buchi delle collisioni binarie. Se rappresentiamo il tipo topologico di una curva chiusa con la successione di eclissi ci sono delle ridondanze: molte diverse successioni di eclissi codificano lo stesso tipo topologico di curva. Consideriamo per esempio il tipo topologico «gira una volta attorno al buco che si ottiene escludendo la collisione binaria 23». La successione di eclissi 23 rappresenta proprio questo tipo topologico, ma vanno bene anche le successioni 2223, 222223 e 2333. Ogni volta che l'arco 2 viene attraversato due volte consecutivamente, possiamo cancellare questi due attraversamenti raddrizzando i meandri, facendo così in modo che quella parte della curva rimanga in un emisfero o nell'altro senza attraversare l'equatore. Per la precisione, possiamo annullare qualsiasi coppia consecutiva formata dallo stesso numero che si verifica in una successione di eclissi senza cambiare il tipo topologico di curva chiusa rappresentato dalla successione.

Successione di eclissi

Per usare il nostro teorema principale per rispondere alla mia vera domanda, basta notare che eliminando coppie consecutive posso fare in modo che la successione di eclissi che codifica un dato tipo topologico non contenga mai due numeri consecutivi uguali: non compaiono mai «11», «22» o «33». Chiamiamo una successione di questo tipo «successione ammissibile». A questo punto prendiamo una qualsiasi successione ammissibile, per esempio 123232. Usiamo la notazione esponenziale per scrivere le successioni di eclissi: per esempio, 1^3 = 111. Scegliamo un numero intero dispari n maggiore o uguale del numero N del nostro teorema principale. Sostituiamo la successione ammissibile con la successione più lunga $1^n\ 2^n\ 3^n\ 2^n\ 3^n\ 2^n$ e facciamola proseguire in modo periodico. Questa successione più lunga rappresenta lo stesso tipo topologico scelto all'inizio perché n è dispari. Il nostro teorema dice che questa sequenza più lunga è realizzata da una soluzione periodica. Questa soluzione periodica rappresenta quindi il nostro tipo topologico originale 123232.

E adesso?

Abbiamo ancora molto da fare. Quando formulai la prima volta la mia domanda, quasi vent'anni fa, volevo solo soluzioni con un momento angolare nullo. Si stanno però accumulando indizi che suggeriscono che la risposta alla mia domanda nel caso del momento angolare nullo sia «no». Abbiamo elementi che ci fanno pensare che persino la più semplice sequenza periodica non vuota 23 non sia mai realizzata da una soluzione periodica del problema dei tre corpi con masse uguali e momento angolare nullo.

La nostra domanda principale posta qui, anche per il momento angolare ε, rimane aperta perché il nostro teorema ci ha permesso di realizzare solo sequenze che sono N-lunghe per qualche N grande. Non abbiamo idea, per esempio, su come realizzare le successioni ammissibili, cioè quelle prive di numeri consecutivi dello stesso tipo.

In conclusione, forse non ci siamo avvicinati a «risolvere» il problema dei tre corpi nel senso tradizionale, ma abbiamo imparato molto. E continueremo così: questo problema continuerà a dare moltissimo a quelli di noi che ne sono attratti. Di fatto è ancora possibile trovare nuove idee in uno dei problemi più classici della storia della matematica. ■

PER APPROFONDIRE

A Remarkable Periodic Solution of the Three-Body Problem in the Case of Equal Masses. Chenciner A. e Montgomery R., in «Annals of Mathematics», Vol. 152, n. 3, pp. 881-901, novembre 2000.

Realizing All Reduced Syzygy Sequences in the Planar Three-Body Problem. Moeckel R. e Montgomery R., in «Nonlinearity», Vol. 28, n. 6, pp. 1919-1935, giugno 2015.

Prize Mistake. Pöppe C. e Mukerjee M., Science and the Citizen, febbraio 1997.

The Top 10 Martin Gardner Scientific American Articles. Mulcahy C., in «ScientificAmerican.com», pubblicato on line 21 ottobre 2014. **https://blogs.scientificamerican.com/guest-blog/the-top-10-martin-gardner-scientific-american-articles.**

È reversibile la morte?

Un esperimento in cui sono stati parzialmente riportati in vita cervelli di maiale solleva domande su quando, esattamente, finisce la vita

di Christof Koch

«E la morte non avrà più dominio» -Dylan Thomas, 1933

Presto o tardi, tu morirai, lettore. Moriremo tutti. Perché ogni cosa che ha un inizio ha una fine, conseguenza ineluttabile della seconda legge della termodinamica.

Pochi di noi amano pensare a un fatto tanto spiacevole. Ma una volta che è nato dentro di noi, il pensiero dell'eterno oblio non si può più azzerare, resta acquattato e pronto a balzar fuori fra le ombre dell'inconscio. Nel mio caso, sono diventato pienamente mortale soltanto in età matura. Avevo sprecato tutta la sera con un videogioco di quelli che non si riesce a smettere, uno sparatutto in prima persona, correndo per saloni sotterranei, corridoi inondati, gallerie con svolte da incubo e deserti piazzali sotto un sole straniero, sparando all'impazzata e inseguito da orde di alieni, senza respiro. Poi andai a letto e mi addormentai facilmente, ma qualche ora dopo mi risvegliai di colpo. La conoscenza astratta si era trasformata in realtà percepita: anch'io sarei morto, dovevo morire! Non lì e in quel momento; ma comunque alla fine dovevo morire.

L'evoluzione ha dotato la nostra specie di potenti meccanismi di difesa per affrontare questa preveggente consapevolezza: in particolare la soppressione psicologica e la religione. La prima ci evita di riconoscere consapevolmente questo tipo di scomode verità o di indugiarvi troppo, mentre l'altra ci rassicura promettendoci la vita senza fine del paradiso dei cristiani, l'eterno ciclo di reincarnazioni dei buddhisti o l'*upload* della mente nel Cloud, l'idea di estasi dei nerd del XXI secolo.

La morte non domina in questo modo gli altri animali. Possono provare dolore per la morte della prole o di un compagno, ma non ci sono prove credibili che grandi scimmie, cani, corvi e api abbiano menti abbastanza consapevoli di sé da turbarsi per l'intuizione che un giorno non ci saranno più. I nostri meccanismi di difesa, dunque, devono essersi sviluppati in tempi recenti nella storia evolutiva degli ominini, nel corso di meno di 10 milioni di anni.

Tradizioni religiose e filosofiche insegnano da gran tempo a fare il contrario: fissa dritto lo sguardo negli occhi vuoti della morte e le toglierai l'aculeo. La quotidiana considerazione del non essere ne allevia i terrori. Ma da scienziato che sa di dover morire le mie riflessioni si volgono a cercare di capire che cosa sia la morte.

Chi si impegna in questa ricerca si renderà presto conto che la morte, così incombente appena oltre l'orizzonte, è alquanto mal definita, dal punto di vista scientifico come da quello medico.

Dal petto alla testa

Nel corso della storia, tutti sapevano che cos'era la morte. Quando una persona non respirava più e il battito del suo cuore cessava per più di qualche minuto era morta: tutto qui. La morte era un momento ben definito del tempo.

IN BREVE

La definizione di morte è cambiata nel corso dei millenni. In origine significava cessazione del respiro e del battito cardiaco.

L'avvento della ventilazione artificiale ha spostato la sede della morte dal cuore al cervello: morire è diventato perdere le funzioni cerebrali, coma irreversibile.

La parziale rivitalizzazione di cervelli di maiale a distanza di alcune ore dalla loro decapitazione, dimostrata in un recente esperimento, potrebbe rovesciare anche questa definizione della morte.

Illustrazione di Bill Mayer

Tutto ciò è cambiato con l'avvento della ventilazione polmonare meccanica e dei pacemaker cardiaci, a metà del XX secolo. La moderna terapia intensiva, con la sua alta tecnologia, ha disaccoppiato cuore e polmoni dal cervello, da cui dipendono mente, pensiero e azione. In risposta a questi sviluppi tecnologici, un famoso Rapporto della Commissione *ad hoc* della Harvard Medical School del 1968 ha introdotto il concetto di coma irreversibile, cioè della perdita delle funzioni cerebrali. A questo adeguamento è stata poi data forza di legge, negli Stati Uniti, con l'Uniform Determination of Death Act nel 1981. In esso la morte è definita come l'irreversibile cessazione delle funzioni circolatoria e respiratoria o l'irreversibile arresto della funzione cerebrale. Molto semplicemente, la persona è morta quando è morto il cervello.

Questa definizione, più o meno, è quella in uso nella massima parte del mondo avanzato. La «sede» della morte è passata dal petto al cervello (e dalla pubblica visibilità alla sfera privata della stanza d'ospedale), con il momento dell'effettiva morte cerebrale che rimane incerto. La vasta e rapida accettazione della morte cerebrale, riaffermata negli Stati Uniti da una commissione presidenziale nel 2008, è particolarmente notevole nel confronto con le incessanti controversie sull'aborto e l'inizio della vita. Il che forse riflette un'altra asimmetria spesso ignorata: la gente si tormenta su ciò che succederà nell'aldilà, ma in genere non si domanda neppure dov'era prima di nascere...

Biologia e medicina mancano ancora di una comprensione coerente di che cosa definisce la morte

La grande maggioranza delle morti accade tuttora in seguito alla cessazione dell'attività cardiopolmonare, che poi mette fine anche all'attività del cervello. La morte cerebrale – definita da coma irreversibile e assenza di reazioni, riflessi del tronco cerebrale e respirazione – è insolita fuori dalle unità di terapia intensiva, in cui vengono tipicamente ricoverati i pazienti con lesioni cerebrali traumatiche o dovute ad anossia, o in coma tossico-metabolico (da overdose di oppiacei, per esempio).

La morte cerebrale sarà pure l'elemento su cui poggia la definizione, ma questo non semplifica la diagnosi clinica: i processi biologici possono persistere anche dopo che il cervello si è spento. Un corpo cerebralmente morto, anzi, può essere mantenuto «in vita» o «in supporto vitale» per ore, giorni o ancora più a lungo. Per gli amici e i parenti addolorati può essere difficile capire quel che succede. Quando vanno in visita all'unità coronarica vedono il petto che si alza e si abbassa, sentono battere il polso, il pallore della pelle sembra normale, e il corpo è caldo. Sembra più sano di qualcuno dei vivi lì intorno; ma per legge quella persona cara è un morto, un cadavere dove ancora batte il cuore. Che viene ventilato e tenuto in questo stato di semi-vita perché adesso è un potenziale donatore d'organi. Se viene concessa l'autorizzazione, dal cadavere si potranno prelevare gli organi che serviranno ai vivi.

Nei corpi cerebralmente morti possono continuare a crescere le unghie e a prodursi le mestruazioni, e almeno una parte delle funzioni immunitarie può continuare a combattere le infezioni. Sono noti non meno di 30 casi di donne gravide cerebralmente morte ma sottoposte a respirazione assistita come supporto alla prosecuzione della gravidanza, fino a una nascita avvenuta settimane o mesi (in un caso, 107 giorni) dopo la morte cerebrale della madre. Un articolo comparso nel 2018 sul «New Yorker» parla del caso di una giovane donna, Jahi McMath, che la famiglia ha tenuto in casa in respirazione assistita e con tutte le cure del caso dopo la morte cerebrale avvenuta in ospedale. Per la legge, e per l'opinione medica consolidata, era morta. Per la sua famiglia piena d'affetto, ha vissuto ancora per quasi cinque anni e poi è morta per un'emorragia associata a insufficienza epatica.

Christof Koch è *chief scientist* e presidente dell'Allen Institute for Brain Science di Seattle. Fa parte del comitato scientifico di «Scientific American». Il suo ultimo libro è *The Feeling of Life Itself: Why Consciousness Is Widespread but Can't Be Computed* (MIT Press, 2019).

Malgrado i progressi tecnologici, biologia e medicina mancano ancora di una comprensione coerente e di principio di che cosa definisca con precisione la nascita e la morte, i due estremi che delimitano la vita. Più di due millenni fa, Aristotele diceva che ogni corpo vivente è più della somma delle sue parti. E insegnava che l'anima vegetativa di ogni organismo – fosse pianta, animale o persona – è la forma, l'essenza, di quell'essere.

L'essenza dell'anima vegetativa consta delle capacità di nutrizione, crescita e riproduzione che dipendono dal corpo. Quando queste capacità vanno perdute, l'organismo cessa di essere animato (parola che rimanda al latino *animus*, anima). L'anima sensitiva, poi, media le capacità degli animali come dell'uomo di percepire il modo e il proprio corpo. È la più vicina a ciò che oggi chiamiamo «esperienza cosciente». Infine, l'anima razionale riguarda solo le persone, e media ragione, linguaggio e facoltà di parola. E oggi, ovviamente, è sempre più imitata dagli algoritmi dell'intelligenza artificiale.

Il crescente predominio di apprendimento automatico, genomica, proteomica e big data dei tempi in cui viviamo ci dà l'illusione di capire che cosa sia l'anima vegetativa. Ma cela invece la profondità della nostra ignoranza su come si spieghi il crollo dell'anima vegetativa. Resta la sfida concettuale di definire un corpo vivente; che chiaramente è più della somma dei suoi singoli organi. Come si può delimitare con precisione questo corpo, nello spazio (vestiti, impianti dentali, lenti a contatto: fanno parte del corpo?) e nel tempo (il suo principio e la sua fine)?

Si noti la parola «irreversibile» nell'attuale definizione della morte neurologica. In assenza di una precisa formulazione concettuale di quando un organismo è vivo o morto, il concetto di irreversibilità dipende dalla tecnologia del momento, che è sempre in evoluzione. Ciò che era irreversibile ai primi del XX secolo – la cessazione del respiro – alla fine di esso era diventato reversibile. È tanto difficile contemplare la possibilità che la stessa cosa si avveri per la morte cerebrale? Un recente esperimento suggerisce che non sia una fantasticheria insensata.

Parziale risveglio di cervelli morti

Quest'anno un gruppo di medici e scienziati della Yale School of Medicine, condotto da Nenad Sestan, ha approfittato delle centinaia di maiali uccisi in uno dei mattatoi autorizzati dal Department of Agriculture degli Stati Uniti per eseguire un notevole esperimento, poi pubblicato su «Nature». I ricercatori hanno estratto i cervelli dai crani e collegato carotidi e vene a un dispositivo di perfusione che imita il battito cardiaco e fa circolare una sorta di sangue artificiale, una miscela sintetica di composti che trasportano ossigeno e farmaci protettivi per le cellule. La magia sta tutta nell'esatta composizione della soluzione circolante. Un po' come le macchine per la dialisi a circuito chiuso che migliaia di

pazienti usano ogni giorno per lavare via le tossine dal corpo, perché i loro reni hanno smesso di funzionare.

Queste macchine sono necessarie perché quando il sangue cessa di scorrere attraverso il cervello, che è grande e richiede molta energia, le sue riserve di ossigeno si esauriscono nel giro di qualche secondo e si perde conoscenza. La privazione dell'ossigeno e del flusso sanguigno, se dura più di qualche minuto, innesca danni irreversibili. Le celle cominciano a degenerare in vari modi (danni tissutali e decomposizione, edema e via dicendo), ben visibili al microscopio.

Il gruppo di Sestan ha studiato la capacità di sopravvivenza dei cervelli quattro ore dopo che i maiali erano stati storditi elettricamente, dissanguati e decapitati. I ricercatori hanno confrontato vari indicatori biologici con quelli dei cervelli dei maiali di controllo non sottoposti alle procedure di perfusione, quattro ore dopo la morte, che per un sistema delicato come quello nervoso è un'eternità.

A prima vista, i cervelli recuperati con la soluzione circolante sembravano relativamente normali. Quando la miscela circolava, la sottile rete di arterie, capillari e vene che pervade il tessuto cerebrale rispondeva in modo appropriato; l'integrità dei tessuti era preservata, con una riduzione del rigonfiamento che porta alla morte cellulare; le sinapsi, i neuroni e i filamenti che ne trasmettono i segnali in uscita (gli assoni) parevano normali. Le cellule della glia, spesso sottovalutate ma essenziali come supporto ai neuroni veri propri, mostravano una certa funzionalità, e il cervello consumava ossigeno e glucosio, la moneta energetica universale del corpo, indicando un certo funzionamento metabolico. Il titolo del lavoro con cui i ricercatori hanno presentato la loro tecnologia dice senza reticenze: *Ripristino della circolazione e di funzioni cellullari nel cervello qualche ora dopo la morte*.

Che accadrebbe rimuovendo dalla soluzione di perfusione le sostanze che bloccano l'attività neurale?

Quel che mancava erano le onde cerebrali, quelle dei comuni tracciati elettroencefalografici. Gli elettrodi posti sulla superficie del cervello dei maiali non hanno misurato nessuna attività elettrica globale spontanea: nessuna delle onde lente che si muovono all'unisono entro la corteccia cerebrale nel sonno profondo, e nessuna improvvisa attività elettrica parossistica seguita da intervalli di silenzio (*burst suppression*). Solo tracciati piatti, dappertutto (linee isoelettriche globali) che implicano la totale assenza di ogni forma di coscienza. Un cervello elettricamente silente non ospita una mente capace di esperienza. Questa però non era una sorpresa: era esattamente lo stato voluto da Sestan e collaboratori, ed è per questo che la soluzione circolante conteneva un cocktail di farmaci che sopprimono le funzioni neurali e inibiscono le comunicazioni sinaptiche tra le cellule.

Pur in assenza di onde cerebrali, è stata una sorpresa per me, ricercatore attivo nel campo delle neuroscienze, che singoli neuroni corticali dei maiali conservassero ancora la capacità di produrre attività elettrica e sinaptica. Il gruppo di Yale lo ha dimostrato prelevando sottili fettine di tessuto neurale da questi cervelli, lavando via la soluzione di perfusione e poi eccitando singoli neuroni con la corrente elettrica somministrata con un minuscolo elettrodo. Alcune di queste cellule hanno risposto appropriatamente, scaricando in un classico impulso singolo, o una serie di impulsi; i cosiddetti potenziali d'azione, che costituiscono la lingua universale delle comunicazioni rapide in tutti i sistemi nervosi avanzati.

Questo solleva profonde questioni: che accadrebbe se il gruppo dovesse rimuovere dalla soluzione di perfusione del cervello le sostanze che bloccano l'attività neurale? Con tutta probabilità, nulla. Il solo fatto che qualche singolo neurone conservi un certo potenziale di eccitabilità non implica che milioni e milioni di neuroni possano auto-organizzarsi spontaneamente e mettersi a cantare elettricamente in coro. E però... Non si può escludere del tutto che con qualche tipo di aiuto esterno, diciamo una sorta di defibrillatore corticale, questi cervelli «morti» non possano essere fatti ripartire, ripristinando i ritmi cerebrali che caratterizzano il cervello vivente.

Decapitare un essere senziente e lasciarne dissanguare il cervello, ovviamente, non può fargli bene. E rianimarlo dopo un trauma così tremendo può facilmente portare a profonde patologie: fortissimi attacchi epilettici, delirio, dolore profondo, angoscia, psicosi e via dicendo. Nessuna creatura dovrebbe mai soffrire così, ed è esattamente per impedirlo che il gruppo di Yale ha bloccato le funzioni dei neuroni.

Il che mi porta, inevitabilmente, al punto, grosso come un macigno, che ho evitato fin qui. Si potrebbe applicare questa procedura al cervello umano?

Prima di ritrarci inorriditi, consideriamo quanto segue. Che cosa vorremmo che si facesse se mai nostro figlio, o il nostro partner, fosse trovato annegato, o vittima di un'overdose, con il respiro e il battito cardiaco fermi da ore? Oggi probabilmente sarebbe dichiarato morto. Potrebbe andare diversamente domani, con il tipo di tecnologia di cui il gruppo di Yale si sta rendendo pioniere? Non è un obiettivo che vale la pena di perseguire?

Il cervello del maiale è grande, molto più di quello del topo, che è l'animale di laboratorio di gran lunga più diffuso. La corteccia cerebrale del maiale, come quella umana, è altamente ripiegata. Fa parte della routine testare le procedure neurochirurgiche sui maiali prima di passare alla sperimentazione umana. Quindi la risposta, tecnicamente, è sì; in linea di principio si potrebbe fare.

Ma è bene farlo?

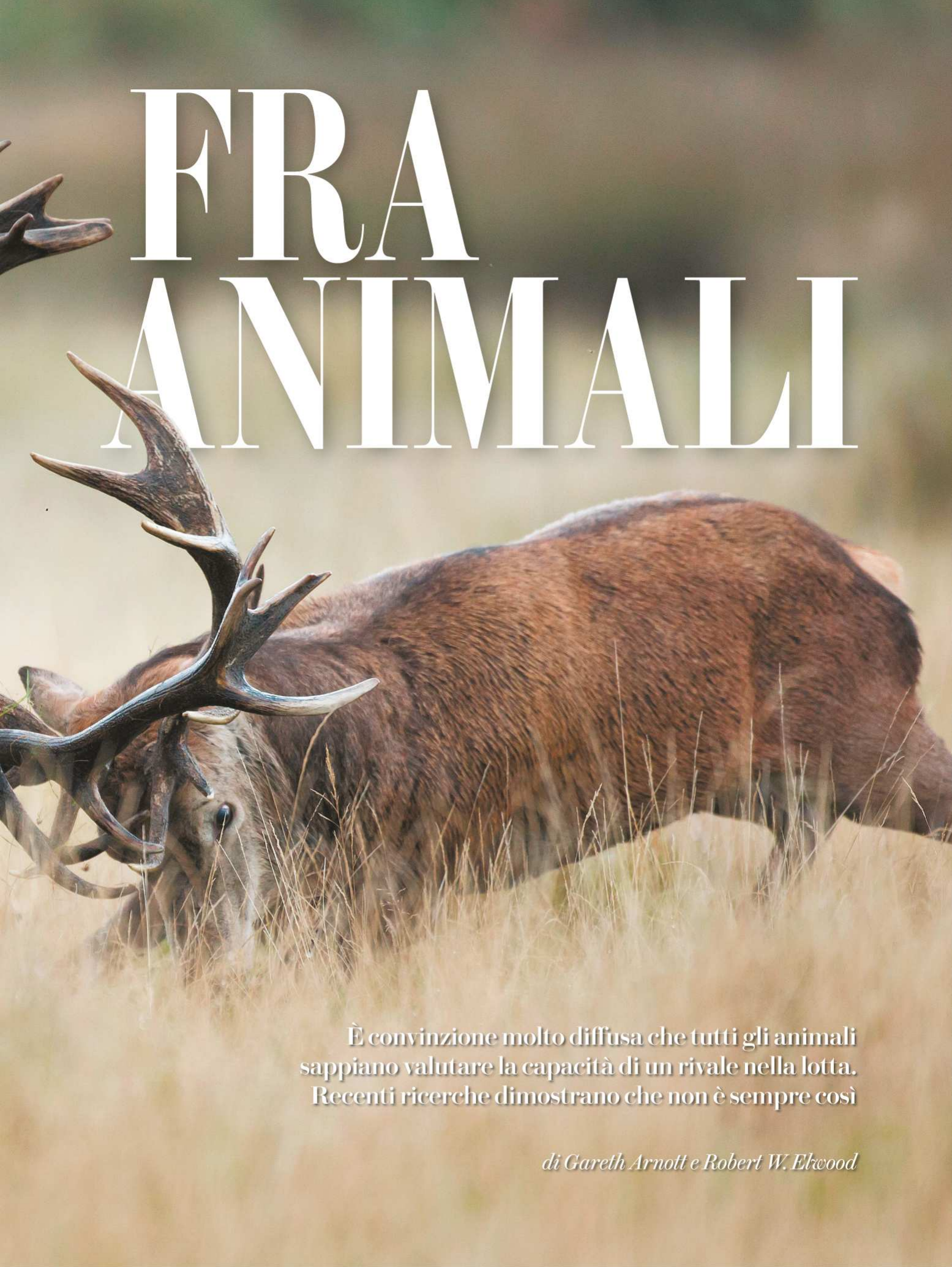
Certamente no, finché non avremo capito molto meglio se un cervello animale rivitalizzato presenta l'attività elettrica globale tipica di un cervello sano, senza risposte di stress che indicano dolore, sofferenza o angoscia. Tutto questo campo di studi dovrebbe fermarsi a discutere le questioni mediche, scientifiche, legali, etiche, filosofiche e politiche poste da queste ricerche con tutti i relativi portatori di interessi.

Ma certo la paura del tristo mietitore non si lascerà reprimere. Presto o tardi, da qualche parte del pianeta, qualcuno cercherà di rubare ancora un po' di tempo alla morte. ■

PER APPROFONDIRE

The Undead: Organ Harvesting, the Ice-Water Test, Beating-Heart Cadavers – How Medicine Is Blurring the Line between Life and Death. Teresi D., Pantheon, 2012.

Modern Death—How Medicine Changed the End of Life. Warraich H., St. Martin's Press, 2017.

Restoration of Brain Circulation and Cellular Functions Hours Post-mortem. Vrselja Z. e altri, in «Nature», Vol. 568, pp. 336–343, 18 aprile 2019.

Brain Restoration System Explores Hazy Territory between. Makin S., in www.scientificamerican.com, 10 aprile 2019.

ETOLOGIA

LOTTE

FRA ANIMALI

È convinzione molto diffusa che tutti gli animali sappiano valutare la capacità di un rivale nella lotta. Recenti ricerche dimostrano che non è sempre così

di Gareth Arnott e Robert W. Elwood

Gareth Arnott è *senior lecturer* di etologia e benessere degli animali presso la Queen's University di Belfast, in Irlanda del Nord. Nelle sue ricerche si occupa del comportamento degli animali in lotta e del loro benessere.

Robert W. Elwood è professore emerito di etologia alla Queen's University di Belfast ed ex presidente dell'Association for the Study of Animal Behaviour.

In una scena della serie di documentari *Africa*, trasmessa dalla BBC nel 2013, una giraffa si avvicina tranquilla avanzando sulla sabbia dorata del Kalahari. «Un giovane maschio», annuncia il narratore, David Attenborough. Il nuovo arrivato si dirige verso un'altra giraffa, e risuona una musica da duello di film western. «Il maschio anziano non vuole rivali», avverte Attenborough mentre le giraffe cominciano a scontrarsi. «Spingendosi e urtandosi si valutano reciprocamente. Il giovane rivale sembra pensare di avere una possibilità e attacca». Pochi secondi dopo colpisce con il collo robusto quello del maschio anziano, ed è lotta aperta: una battaglia sanguinosa per il territorio. «La posta in gioco è alta», spiega Attenborough. «La sconfitta significa l'esilio nel deserto».

I documentari sulla natura presentano spesso simili immagini di animali impegnati in scontri furiosi. Niente di strano, visto che si tratta di scene spettacolari. Ma vi siete mai chiesti come avvengono i processi decisionali alla base di queste lotte? Abbiamo avuto la fortuna di poter dedicare a questo affascinante argomento gran parte della nostra carriera nella ricerca. E il nostro lavoro ha portato conoscenze sorprendenti su ciò che pensano gli animali quando si affrontano.

Gli animali si contendono risorse come il territorio, il cibo e i partner. A volte questi scontri sono leggeri e non causano danni fisici. Altre volte sono violenti e provocano lesioni gravi o mortali. In ultima analisi, determinano una distribuzione irregolare delle risorse, hanno effetti rilevanti sul successo riproduttivo e così spingono l'evoluzione. Una creatura che raccoglie informazioni può trarne vantaggio, evitando scontri potenzialmente mortali con avversari più grandi e più forti.

Noi esseri umani siamo particolarmente bravi a stimare la capacità di combattimento degli altri, e impariamo presto a evitare la lotta con persone più grandi di noi. Nei test di laboratorio i volontari umani sono in grado di valutare con precisione la forza dei maschi dopo averne visto per un attimo in fotografia il torso o il volto, oppure dopo averne sentito la voce. Il giudizio è spontaneo: uomini e donne lo raggiungono in meno di 50 millisecondi. Questa capacità riflette l'importanza che la valutazione precisa degli avversari ha avuto durante l'evoluzione umana.

Gli animali non umani sono altrettanto bravi a valutare i rivali? I documentari come quelli raccontati con tanta eloquenza da Attenborough descrivono spesso in questi termini le motivazioni degli animali. Eppure sono relativamente poche le specie che hanno dimostrato di fare davvero questo tipo di valutazioni. In realtà le nostre ricerche portano a ritenere che molte creature usino informazioni diverse quando decidono se competere o no.

Sfoggio di forza

In genere, prima di affrontarsi nella lotta gli animali eseguono dimostrazioni rituali. Per esempio i cervi maschi che si contendono le femmine ingaggiano elaborate «gare di bramiti» e avanzano impettiti fianco a fianco, per così dire sfilando in parallelo. I ricercatori per lo più hanno considerato questi comportamenti un modo in cui ciascun rivale può dare all'altro informazioni da valutare. Se lo sfoggio basta a risolvere la disputa, non ci sarà bisogno di ingaggiare una lotta col rischio concreto di ferirsi o perfino morire. È meglio impiegare energie per un tempo breve, in modo che – è questo il ragionamento – l'avversario che sente di essere il più debole tra i due si possa ritirare. Questo fenomeno, detto valutazione reciproca, è essenziale in un modello di lotta tratto dalla teoria dei giochi, noto come valutazione sequenziale.

La teoria dei giochi è una branca della matematica applicata sviluppata inizialmente dagli economisti per creare modelli dei processi decisionali strategici negli esseri umani. I biologi non ci hanno messo molto a capire che poteva essere utile per la biologia evolutiva: John Maynard Smith e George Price sono stati i primi a usare questa costruzione teorica per studiare le lotte tra animali. Secondo il modello della valutazione sequenziale, le competizioni si dovrebbero risolvere facilmente nella fase di sfoggio se tra gli avversari c'è una netta differenza di valore, e le lotte dovrebbero avvenire solo quando il divario è ridotto al minimo. Man mano che il confronto sale di intensità diventa sempre più dispendioso, ma dà anche informazioni sempre più precise, quindi la valutazione reciproca continua per tutta la durata della competizione.

Secondo la previsione del modello, maggiore è la differenza di abilità nella lotta tra gli avversari, minore è la durata del confronto. E in effetti per anni i biologi hanno rilevato proprio questo rapporto negativo nelle competizioni di pressoché tutte le specie che hanno studiato. (Per misurare la capacità di lotta in queste occasioni, i biologi usano un indicatore sostitutivo, solitamente le dimensioni o il peso.) In seguito a tutte queste ricerche si è arrivati

IN BREVE

Per molto tempo gli scienziati hanno creduto che, nel competere per le risorse, tutti gli animali sapessero valutare l'abilità nella lotta dell'avversario rispetto alla propria; questa strategia è detta valutazione reciproca.

Gli studi eseguiti nell'ultimo decennio hanno però rivelato che molte specie usano strategie diverse per decidere se lottare o scappare. Per lo più questi individui sembrano in grado di valutare solo sé stessi e non i rivali.

Non è del tutto chiaro che cosa determini quale strategia usa un animale, ma potrebbero avere un ruolo decisivo le capacità cognitive, perché sotto questo aspetto la valutazione reciproca è più impegnativa di altre tattiche.

I pesci combattenti valutano reciprocamente la capacità nella lotta e dimostrano una maggiore aggressività verso gli avversari più temibili.

Jane Burton/Nature Picture Library

a considerare la valutazione reciproca una capacità fondamentale di tutti gli animali.

Nell'entusiasmo con cui si è accolta l'idea di una facoltà universale di valutazione reciproca, tuttavia, qualche altra interpretazione dei confronti tra animali è passata abbastanza inosservata. Con la valutazione reciproca ci si aspetterebbe che i perdenti di grandi dimensioni resistano più a lungo nella competizione rispetto a quelli più piccoli, dato che il perdente decide di abbandonare anche in base alla propria mole o abilità nel combattimento. E se il perdente raccoglie informazioni sul vincitore, dovrebbe ritirarsi prima se quest'ultimo è grande. Gli studi che hanno esaminato questi collegamenti sono pochi, ma alcuni hanno evidenziato il previsto rapporto positivo tra la mole del perdente e la resistenza nel confronto. Ma c'era un problema: il legame tra le dimensioni del vincitore e le durata della lotta non era diverso da una relazione casuale. La scoperta ha portato a ritenere che, in questi casi, il perdente avesse informazioni su di sé, ma non sull'avversario. Questi animali non erano in grado di ottenere le informazioni, o acquisirle era troppo impegnativo, oppure sceglievano di non usare informazioni che con ogni probabilità avrebbero permesso loro di fare la scelta migliore per la lotta. In ogni caso, eseguivano un'autovalutazione invece di una valutazione reciproca.

Alcuni di questi primi esempi di autovalutazione provengono dal laboratorio di uno di noi (Elwood). Nel 1990, insieme con i suoi colleghi, ha documentato questa tattica negli anfipodi, piccoli animali simili a gamberetti. In questa specie i maschi si contendono le femmine con una lotta simile al tiro alla fune: le strappano via letteralmente dalle chele dei rivali. Come prevedibile, si è scoperto che i maschi più grandi riescono meglio di quelli piccoli a sferrare gli attacchi e a resistervi. Eppure gli avversari non davano l'impressione di valutarsi reciprocamente: mentre si manifestava un forte rapporto positivo tra il peso del perdente e la durata del confronto, per il vincitore i due dati non avevano alcun legame.

La comunità dei biologi ha in gran parte liquidato questa scoperta come un'anomalia. Ma c'erano altri esempi: come quello di *Metellina mengei,* una specie di ragno della famiglia degli Araneidi. Durante le competizioni tra maschi per conquistare le femmine, i ragni smettevano di combattere ed estendevano le lunghissime zampe anteriori, apparentemente per confrontarle: davano tutta l'impressione di scambiarsi informazioni. Anche stavolta però la mole del vincitore non era collegata alla durata del confronto, a prova del fatto che questo sfoggio non influiva sulla decisione dei ragni. I maschi erano in grado di valutare solo se stessi, non gli altri.

La scoperta, in questi ragni, dell'autovalutazione invece della valutazione reciproca, ha stimolato Phil Taylor, zoologo, oggi alla Macquarie University di Sydney, a mettersi in contatto con Elwood. Stava preparando un saggio sulle lotte in una specie di ragni della famiglia dei Salticidi, ed era rimasto sorpreso nel riscontrare anche in quelli l'autovalutazione invece della valutazione reciproca. Il contatto ha portato i due a collaborare per scoprire perché, se gli animali usano dell'autovalutazione, le analisi più comuni prevedevano invece la valutazione reciproca.

Taylor ed Elwood hanno usato una simulazione al computer per creare il modello di una popolazione di animali che competono in base alle regole dell'autovalutazione, in cui il perdente non ottiene informazioni sulla capacità del vincitore. I risultati hanno evidenziato un rapporto negativo tra la differenza di mole e la durata del confronto – tanto più breve quanto maggiore era il divario tra le dimensioni – proprio come previsto per la valutazione reciproca. Il motivo è che con una forte differenza di dimensioni il perdente deve per forza essere molto piccolo, mentre è più probabile che sia un po' più grande se la differenza è leggera. Così, se l'esito è determinato solo dal perdente ma l'analisi si basa sulla differenza di mole, sembrerà avvalorare la valutazione reciproca. In altre parole, lo strumento che i biologi usavano da molti anni per studiare i confronti tra animali poteva dare un'impressione sbagliata delle loro capacità di valutazione.

Questo problema è illustrato dagli studi sui Diopsidi. Si tratta di insetti dall'aspetto curioso, con gli occhi situati in cima a pedun-

coli, simili a corna, che sporgono dalla testa. I maschi si contendono il cibo e le femmine. Secondo un primo studio basato sulla differenza di mole, questi animali confrontano i rispettivi peduncoli per stabilire il vincitore. Poi i ricercatori hanno rianalizzato i dati originali, usando separatamente le dimensioni del vincitore e del perdente, e la durata dello scontro. Questo metodo ha dimostrato senza dubbio che il perdente usa le informazioni sulla propria mole per decidere se continuare a competere, ma non ne deve avere sulla grandezza del vincitore, perché quel fattore non influisce sulla durata della competizione.

Un rapporto positivo o non significativo tra la mole del vincitore e la durata dello scontro, insieme a un rapporto positivo tra le dimensioni del perdente o la sua abilità nella lotta e la durata della competizione, indica ciò che chiamiamo «autovalutazione pura»: i partecipanti decidono se scendere nell'arena o ritirarsi solo in base alle informazioni che hanno su di sé. Ma se rileviamo un rapporto *negativo* tra le dimensioni del vincitore e la durata della competizione, non significa per forza che il perdente raccolga informazioni sull'avversario. Potrebbe invece essere in corso un altro processo decisionale, detto valutazione cumulativa.

In questo caso gli animali possono imporsi reciprocamente dei costi, e maggiore è la differenza di mole, maggiori sono i costi per il rivale più piccolo, che quindi si arrende appena questi raggiungono una soglia. Forse sembra che stiamo spaccando il capello in quattro, ma c'è una notevole differenza tra la valutazione cumulativa e quella reciproca. Con la prima non si valuta direttamente l'avversario; il confronto si decide solo dopo che si sono accumulati i costi. La seconda non determina una soglia; sono invece le informazioni raccolte sull'avversario e su di sé che permettono di decidere se continuare la competizione oppure gettare la spugna.

Anche se la valutazione cumulativa e quella sequenziale producono lo stesso legame negativo tra la mole del vincitore e la durata dello scontro, abbiamo qualche strumento per stabilire quale dei due processi decisionali è adottato dagli animali. In primo luogo possiamo allestire competizioni in laboratorio: ciascuna avviene tra rivali con la stessa mole, ma le loro dimensioni medie variano di volta in volta. Se i contendenti adottano la valutazione cumulativa, chi finirà per perdere conosce solo il proprio stato, e quindi i perdenti grandi dovrebbero resistere più a lungo. In questo caso ci aspetteremmo di vedere un legame positivo tra dimensioni medie e durata dello scontro. Con la valutazione sequenziale, invece, la decisione si basa sulla differenza di mole relativa, e tra avversari delle stesse dimensioni non ci sono differenze, a prescindere dai loro valori assoluti. Così ci aspetteremmo di non vedere alcun legame tra la grandezza media della coppia e la durata della competizione, se i rivali adottano la valutazione sequenziale.

Per distinguere tra le due strategie decisionali, inoltre, possiamo considerare l'aumento o la diminuzione di intensità dei confronti. Gli animali che si basano sulla valutazione cumulativa dovrebbero manifestare fasi di escalation, intervallate da fasi con attività meno dispendiose. Quelli che invece adottano la valutazione sequenziale dovrebbero seguire un andamento lineare verso attività sempre più impegnative.

Tante decisioni

La scoperta che gli animali usano forme di valutazione diverse quando si affrontano, insieme con lo sviluppo di protocolli di ricerca in grado di distinguere queste strategie, ha ravvivato l'interesse per le lotte tra gli animali. Nell'ultimo decennio sono stati eseguiti studi su un'ampia gamma di specie, e hanno portato molti nuovi esempi di creature che usano l'una o l'altra di queste tre strategie principali. Vale la pena di notare che per la maggior parte si avvalgono dell'autovalutazione.

Altri studi hanno dimostrato che alcune specie si basano su un abbinamento di metodi per capire quando ritirarsi dalla lotta e quando scendere nell'arena. Tra i *killifish* delle mangrovie, per esempio, gli individui si contendono il territorio. Ricercatori guidati da Yuying Hsu, della National Taiwan Normal University, hanno scoperto che i rivali decidevano se combattere in base allo sfoggio avvenuto prima della lotta. In questa fase del confronto, più grande era uno dei due contendenti più era probabile che l'avversario più piccolo si ritirasse prima che il confronto sfociasse nel combattimento. Tendenzialmente i rivali di taglia più simile arrivavano a lottare. Tuttavia sembravano non ottenere altre informazioni sull'avversario dopo l'inizio dello scontro. Questa valutazione variabile appare come una strategia mista, in cui prima si valuta l'avversario e poi se stessi.

I nostri studi sui paguri Bernardo hanno rivelato un altro criterio per prendere decisioni. Questi crostacei recuperano le conchiglie delle lumache morte e le usano per proteggersi il delicato addome. I paguri lottano per prendere la conchiglia di un rivale. Abbiamo scoperto che, durante questi tentativi di conquista, gli avversari ottengono informazioni diverse a seconda del proprio ruolo. A quanto pare, chi attaccava riceveva poche informazioni o nessuna su chi si difendeva, che invece era influenzato dal modo di lottare dell'attaccante. Così sembra che nell'ambito dello stesso confronto un ruolo adottasse l'autovalutazione e l'altro la valutazione reciproca.

L'esistenza di tutte queste forme di valutazione pone una domanda interessante: che cosa determina la strategia decisionale adottata da un animale? Può darsi che entri in gioco la capacità cognitiva. Secondo alcuni esperti, conoscere soltanto le proprie condizioni è facile, ma integrarle o confrontarle con quelle dell'avversario è più difficile dal punto di vista cognitivo. Questa idea deve ancora essere verificata in modo sistematico, ma appare piuttosto plausibile se si dà un rapido sguardo ai taxa con livelli diversi di complessità cognitiva. Gli anemoni di mare, per esempio, hanno una rete neurale semplice, e l'analisi delle loro lotte fa pensare che si basino sull'autovalutazione. All'altro estremo, si è scoperto che gli animali complessi con sistemi di percezione avanzati, come le seppie, si avvalgono della valutazione reciproca.

Fight club: i grilli domestici (*Acheta domesticus*, 1) usano la valutazione cumulativa per decidere se lottare o no. I pomodori di mare (*Actinia equina*, 2) adottano l'autovalutazione. Nelle lotte tra paguri bernardo (*Pagurus bernhardus*, 3), gli attaccanti usano l'autovalutazione e i difensori la valutazione reciproca.

In base a questo principio supponiamo che i mammiferi, con un cervello grande e molto sviluppato, usino la valutazione reciproca. Tuttavia il tipo di esperimento necessario per distinguere i vari modelli di valutazione è stato applicato raramente ai mammiferi. Uno di quelli su cui però abbiamo dati sperimentali è il maiale domestico. Uno di noi (Arnott) collabora da tempo con Simon Turner, del Rural College, in Scozia, e Irene Camerlink, della University of Veterinary Medicine di Vienna, per studiare l'aggressività dei maiali, con l'obiettivo di migliorare il benessere degli animali d'allevamento. I suini tendono per natura a formare gerarchie di dominanza. Una pratica abituale durante l'allevamento è raggrupparli in varie fasi del ciclo produttivo. A ogni riorganizzazione degli animali segue un periodo carico di aggressività, man mano che si crea una nuova gerarchia. Queste frequenti aggressioni rappresentano un problema grave per il loro benessere.

Esaminando più da vicino questi episodi abbiamo rilevato che i maiali adottano la valutazione reciproca, ma per usarla abilmente hanno bisogno di una precedente esperienza nelle competizioni. Il passo successivo è stato provare a dare l'esperienza necessaria, ma evitando le aggressioni con le loro conseguenze negative. A questo scopo abbiamo deciso di fare un esperimento modificando l'ambiente in cui crescono i suini nelle prime fasi della vita. E abbiamo scoperto che i maialini cui era permesso unirsi a un'altra figliata prima dello svezzamento sviluppavano poi migliori capacità sociali, grazie a cui da adulti riuscivano ad avere confronti più brevi quando venivano in contatto con un individuo sconosciuto. Stando ai risultati dei nostri studi, una semplice socializzazione nelle prime fasi della vita potrebbe essere una misura pratica ed efficace da adottare per ridurre le lotte tra i maiali adulti durante la riorganizzazione.

C'è un altro aspetto delle competizioni che vale la pena di citare. Probabilmente la capacità cognitiva aiuta a determinare il tipo di valutazione usato da un animale, ma non è l'unico fattore in gioco. La decisione può essere influenzata dal valore stesso della risorsa che si può conquistare o perdere. Un ottimo esempio viene dalle conchiglie dei paguri: quando se le contendono, un individuo detto «attaccante» (di solito il più grande) si avvicina e afferra la conchiglia del difensore, che quindi si ritira al suo interno. Poi l'attaccante colpisce fortemente con la propria conchiglia quella del difensore, più e più volte. Questa raffica di colpi finisce o con uno spettacolare sfratto del difensore o con la resa da parte dell'attaccante, che si ritira a mani vuote.

Abbiamo scoperto che i paguri considerano svariati aspetti delle conchiglie per decidere quanto vale la pena di lottare. Una variabile essenziale è la dimensione della conchiglia rispetto a quella del paguro: l'ideale è che sia abbastanza piccola da potersi trasportare con un dispendio di energia minimo, ma abbastanza grande da permettere una certa crescita. I paguri modificano il proprio comportamento dopo avere valutato la propria conchiglia e quella dell'avversario. Quando gli attaccanti hanno una conchiglia scadente, peggiore di quella dei rivali, è più probabile che intensifichino l'aggressione e riescano nel loro intento; quando i difensori hanno una conchiglia di scarso valore, si oppongono alla sua conquista con minor forza.

Così, la prossima volta che guarderete un documentario sulla natura con lotte tra animali, saprete che quell'interazione è piena di significato. Ma in molti casi, come in quello delle giraffe, bisogna ancora stabilire se davvero «si valutano reciprocamente», qualunque cosa vi racconti il narratore. ■

PER APPROFONDIRE

Information Gathering and Decision Making about Resource Value in Animal Contests. Arnott G. ed Elwood R.W., in «Animal Behaviour», Vol. 76, n. 3, pp. 529-542, settembre 2008.

Assessment of Fighting Ability in Animal Contests. Arnott G. ed Elwood R.W., in «Animal Behaviour», Vol. 77, n. 5, pp. 991-1004, maggio 2009.

Animal Contests. Hardy I.C.W. e Briffa M. (a cura), Cambridge University Press, 2013.

All by Myself? Meta-analysis of Animal Contests Shows Stronger Support for Self Than for Mutual Assessment Models. Pinto N.S. e altri, in «Biological Reviews». Pubblicato on line il 27 marzo 2019.

Video di una lotta fra paguri, dal laboratorio degli autori: **https://www.youtube.com/watch?v=dlhzzEObnRs&feature=youtu.be.**

Il cordoglio dell'orca. King B.J., in «Le Scienze» n. 610, luglio 2019.

La rilevazione di onde gravitazionali è ormai un evento quasi ordinario e contribuisce sempre di più alla nostra comprensione del cosmo

Le onde dell'universo

Il 14 settembre 2015, laser sotterranei in Louisiana e nello Stato di Washington, negli Stati Uniti, hanno oscillato insieme in risposta a un disturbo nello spazio-tempo, aprendo una nuova finestra sul cosmo. I due siti fanno parte del rivelatore di onde gravitazionali LIGO: laser potenti e sensibili, isolati dal moto delle Terra per rilevare vibrazioni incredibilmente piccole. Il segnale era un'onda gravitazionale, un'increspatura nello spazio-tempo creata dalla fusione di due buchi neri lontani 1,4 miliardi di anni luce, ben oltre la nostra galassia. L'evento, la prima rilevazione di onde gravitazionali, ha anche provato che i buchi neri possono orbitare uno attorno all'altro e fondersi. Da allora, i sensori hanno rilevato altri 43 eventi [anche grazie al rivelatore europeo Virgo, in Italia. NdR]. I dati sempre più numerosi aiutano gli astronomi a capire meglio gli oggetti che popolano il cosmo.

Katie Peek

4000 megaparsecs (Mpc) dalla Terra

Sorgente di onde gravitazionali

Evento record
Fusione di due buchi neri a 5200 Mpc, l'evento più remoto rilevato da LIGO e Virgo il 6 luglio 2019.

2000 Mpc (6,5 miliardi di anni luce)

Grandi distanze
Gli eventi si sono verificati sorprendentemente lontano dalla Terra; la nostra galassia, la Via Lattea, ha un diametro di soli 0,03 Mpc.

Terra e Via Lattea (*centro*)

Evento zero
Il primo evento rilevato, il 14 settembre 2015, è stato generato dalla fusione di due buchi neri.

Legenda
I simboli indicano 44 rilevazioni di LIGO e Virgo al 1 ottobre 2019. Direzioni e distanze approssimative sono relative alla Via Lattea, una piccola spirale al centro.

Presa dati
O1 (2015)
O2 (2017)
O3 (2019, non verificati)

Tipo di evento
Fusione tra due buchi neri
Fusione tra un buco nero e una stella di neutroni
Fusione tra due stelle di neutroni

Massa
Massa di oggetti che si fondono (masse solari approssimate)
3 10 20 80
Per O3, le masse non sono ancora state calcolate, così i simboli sono della stessa dimensione

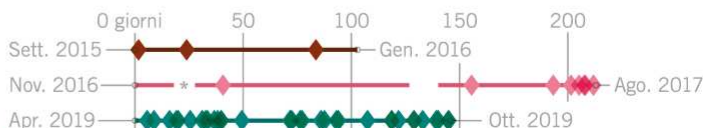
Coppie asimmetriche
Nel 2019 LIGO e Virgo hanno osservato il primo segnale generato probabilmente da una fusione di una stella di neutroni con un buco nero. Al 1 ottobre, sono stati rilevati cinque di questi segnali.

Incontri ravvicinati
Le stelle di neutroni, meno massicce dei buchi neri, producono segnali più deboli quando si fondono tra loro, così LIGO e Virgo vedono solo eventi relativamente vicini alla Terra.

Localizzazione approssimativa
Sono necessari molti rilevatori per localizzare con esattezza un evento, così gli eventi illustrati potrebbero essersi verificati ovunque all'interno di una regione locale, come questa qui in rosa. Più rilevatori saranno costruiti, più le localizzazioni diventeranno precise.

Ritmo accelerato di scoperte

LIGO ha rilevato tre eventi confermati durante la sua prima presa dati (O1) in quattro mesi del 2015. In O3, di cui fa parte anche Virgo, che ha contribuito parzialmente pure a O2, le rilevazioni si sono accumulate cinque volte più velocemente (alcune potrebbero non superare un controllo scientifico). L'aumento è stato dovuto a miglioramenti ai rivelatori.

0 giorni 50 100 150 200
O1: 3 rilevazioni Sett. 2015 – Gen. 2016
O2: 8 rilevazioni Nov. 2016 – Ago. 2017
O3: 33 rilevazioni (al 1 ottobre 2019) Apr. 2019 – Ott. 2019

*Le lacune rappresentano interruzioni di una settimana o più lunghe, quando i rivelatori non erano operativi

Grafica di Katie Peek; Fonti: Gracedb—Banca dati degli eventi candidati di LIGO; *GWTC-1: A Gravitational-Wave Transient Catalog of Compact Binary Mergers Observed by Ligo and Virgo During the First and Second Observing Runs*, di B. P. Abbott e altri (Collaborazione LIGO e Collaborazione Virgo), in «Physical Review X», Vol. 9, articolo 031040, luglio 2019

giornalista informatico e studioso
della disinformazione nei media

Brevetti militari e fusione nucleare

Depositare un brevetto su un'invenzione che non funziona può essere utile per depistare il nemico

La fusione nucleare, con la sua promessa di energia pulita e inesauribile, è da decenni oggetto di ricerche intense e costosissime, ma finora nessuno è riuscito a ottenerla in modo stabile e a generare più energia di quanta ne venga immessa per l'innesco. Tuttavia, la Marina militare degli Stati Uniti ha depositato un brevetto, recentemente approvato, che descrive un rivoluzionario reattore a fusione nucleare capace di generare potenze di vari gigawatt immettendovi qualche chilowatt. Il reattore sarebbe oltretutto molto compatto, con dimensioni di qualche metro. Il brevetto descrive in dettaglio il funzionamento di questo reattore compatto, per cui basta seguirne le istruzioni per fabbricarne uno.

A prima vista, insomma, la lunga caccia al reattore a fusione nucleare sarebbe finita di colpo, spiazzando tutti i ricercatori civili grazie alle avanzatissime ricerche militari effettuate in segreto, come nelle migliori fantasie di cospirazione.

Il segreto che non c'è

Normalmente l'approvazione di un brevetto è considerata come una certificazione di efficacia e realizzabilità dell'invenzione, inoltre in questo caso l'inventore è un ente militare, notoriamente poco propenso alle frivolezze; tuttavia, c'è qualcosa che non torna in tutta la vicenda.

Innanzitutto, un brevetto non certifica che l'invenzione funzioni: si limita a tutelarne l'idea, anche se è irrealizzabile in pratica. Inoltre, se davvero fosse stato scoperto il segreto per la realizzazione di un reattore a fusione operativo, il paese che lo detenesse avrebbe un vantaggio economico e strategico enorme e quindi non avrebbe senso pubblicarne i dettagli in un brevetto. La tutela legale offerta dal brevetto non impedirebbe certo a una potenza rivale di violare la legge e fabbricarsi i propri reattori abusivamente.

La legge statunitense, oltretutto, include l'Invention Secrecy Act, che permette di secretare qualunque invenzione brevettata nel paese che possa minacciare la sicurezza nazionale; è un potere applicato spesso, per esempio nel campo delle armi, delle comunicazioni o della crittografia. Eppure il brevetto del reattore a fusione non è stato secretato.

Armi da guerra

Un altro aspetto bizzarro di questa storia è che il brevetto in questione è assegnato alla Marina statunitense, ma indica come inventore un certo Salvatore Pais, ingegnere aerospaziale presso una base navale in Maryland, che guarda caso è titolare di altri brevetti decisamente di frontiera o al limite della plausibilità, come un generatore di onde gravitazionali, un superconduttore a temperatura ambiente, un generatore di campi di forza e addirittura un veicolo dotato di riduttore della massa inerziale.

Fra i militari statunitensi si annida dunque un genio assoluto e stiamo per assistere a una rivoluzione tecnologica multipla, oppure la Marina e l'Ufficio brevetti degli Stati Uniti hanno di colpo sviluppato un bislacco senso dell'umorismo? Non è detto. C'è anche una terza ipotesi: tutti questi brevetti da fantascienza potrebbero far parte di un piano per confondere e depistare i rivali militari ed economici, portandoli a scialacquare tempo e denaro in ricerche e sperimentazioni basate su questi documenti fittizi e quindi destinate a fallire.

Non sarebbe la prima volta: per esempio, negli anni settanta, durante lo sviluppo dello Space Shuttle, la CIA ne fece pubblicare specifiche tecniche false accanto a quelle vere per confondere i rivali sovietici, che stavano acquisendo freneticamente tutti i documenti pubblici disponibili sull'argomento per estrarne le conoscenze necessarie per costruire il loro veicolo spaziale analogo, il Buran. Le guerre si combattono anche con la falsa scienza.

di Beatrice Mautino

biotecnologa, giornalista e comunicatrice scientifica. Tra i suoi libri più recenti *Il trucco c'è e si vede* (Chiarelettere, 2018)

La bufala che sembra un test

Il cosiddetto «test dell'anello» non dimostra affatto la presenza di piombo in un rossetto

"Mettete del rossetto sulla mano. Usate un anello d'oro da strofinare sul rossetto. Se il colore del rossetto diventa nero, saprete che contiene piombo.»

Il cosiddetto test dell'anello circola in Italia da una decina d'anni, ma negli Stati Uniti era conosciuto da prima. Le istruzioni erano accompagnate da un messaggio in cui si annunciava che «la ditta produttrice del rossetto Red Earth ha diminuito i prezzi da $67 a $9,90. Conteneva piombo. Il piombo causa il cancro. Le marche di rossetto che contengono piombo sono: [...]» e seguiva una lista di aziende. Per individuare la presenza di piombo sarebbe stato sufficiente effettuare il test dell'anello indicato sopra.

Il messaggio ha circolato molto e con il tempo si è modificato. Quella che ho riportato è la prima versione statunitense, tanto che nell'elenco compaiono alcuni marchi qui in Italia pressoché sconosciuti. Dobbiamo crederci?

Colpa dell'anello

Come spesso accade con le cosiddette catene di sant'Antonio qualcosa di vero c'è, anche se poi viene distorto e mescolato a invenzioni con il risultato di creare facile allarmismo. Se vi stendete un rossetto sulla mano e ci strofinate sopra un anello d'oro, è molto probabile che vediate un segno scuro. È la dimostrazione che quel rossetto contiene piombo?

David Mikkelson, fondatore del sito Snopes.com, un riferimento mondiale per le bufale in rete, ha provato a riprodurre il test dell'anello per capire che cosa ci fosse dietro. Ha preso rossetti di intensità e colori differenti, li ha stesi su fogli di carta bianca e oltre all'oro ha usato anche peltro, rame, argento e acciaio inossidabile, ottenendo strisce scure in tutti i casi tranne che per l'acciaio. A questo punto Mikkelson ha fatto quello che negli esperimenti scientifici viene chiamato «controllo negativo». Cioè, se l'ipotesi è che la striscia scura derivi dal piombo presente nel rossetto, dobbiamo verificare che sia dovuta effettivamente al rossetto e non, per esempio, all'anello. Quindi per prima cosa ha preso della cera incolore, che è una delle basi principali dei rossetti, l'ha stesa su fogli di carta e ci ha strofinato sopra i metalli. «Anche in questo caso – scrive Mikkelson – ho ottenuto delle strisce scure». A questo punto, rimaneva da scartare solo l'ipotesi che la reazione fra l'anello e l'eventuale piombo avvenisse nella cera. Quindi ha strofinato gli anelli direttamente sulla carta e, di nuovo, ha ottenuto le strisce grigie.

Che cosa significano questi risultati? Che in effetti il test dimostra la presenza di metalli, ma non del piombo e nemmeno di altri metalli presenti nel rossetto: il metallo della striscia scura, infatti, è quello depositato direttamente dall'anello.

Fare la prova

«Oro, argento e rame – conclude Mikkelson – lasciano queste scie, indipendentemente da quello su cui sono sfregati, allo stesso modo in cui le matite di grafite lasciano segni su qualsiasi superficie lungo la quale sono fatte scorrere. Il fatto che questi segni appaiano più rilevati sullo sfondo di un rossetto è attribuibile al contrasto: le strisce che sembrano grigie su uno sfondo bianco, appaiono marroni su uno sfondo rossastro, e il marrone è un colore più facilmente percepibile dall'occhio».

Potete provare anche voi a casa e vi invito a fare questo genere di esperimenti anche quando leggete di altre prove fantasiose. Ne circola una, per esempio, per determinare la presenza di piombo o altri metalli nell'*henné* e che prevede di immergere una ciocca di capelli in acqua ossigenata con qualche goccia di ammoniaca e, a seconda delle reazioni, dedurre se c'è contaminazione e con che cosa. Come strutturereste l'esperimento per verificare se è vero o no? Che prove fareste?

di Dario Bressanini

chimico, divulgatore, gastronomo. Autore di *Contro natura* (Rizzoli, 2015), *La Scienza della Carne* (Gribaudo, 2016)

C'è intolleranza e intolleranza

A crescere non sono le intolleranze ma l'offerta di metodi diagnostici privi di validità scientifica

«Non passa serata nella mia pizzeria senza che un cliente mi chieda una pizza con delle varianti perché dice di essere intollerante al lievito, al lattosio, al pomodoro e persino all'olio di oliva. Come è possibile che siano diventati tutti intolleranti a qualcosa?». Così si lamentava sconsolato un amico pizzaiolo qualche tempo fa.

Non ci sono prove che esista un'intolleranza al lievito, o all'olio di oliva e a tanti altri cibi. Come mai allora sempre più persone sostengono di essere intolleranti a molti alimenti? Un motivo è l'offerta crescente di metodi per diagnosticare intolleranze alimentari che non sono validati scientificamente o, addirittura, che si sono dimostrati privi di credibilità scientifica e validità clinica. Lo spiega un documento preparato dalle principali società scientifiche italiane di allergologia e immunologia clinica e condiviso dalla Federazione nazionale degli ordini dei medici chirurghi e degli odontoiatri (https://bit.ly/2Nh06lv).

L'allergia è un'altra cosa

Allergie alimentari e intolleranze sono spesso confuse. Un' allergia è una reazione avversa del corpo – come un'orticaria, difficoltà a respirare, un rigonfiamento della lingua, fino a uno shock anafilattico – che coinvolge il nostro sistema immunitario attraverso anticorpi chiamati IgE, verso una componente di quell'alimento, di solito una proteina, che il nostro corpo interpreta come una minaccia. Molti alimenti comuni sono allergenici: pesce, crostacei, frutta a guscio, arachidi, latte vaccino, grano, uova e soia.

Un test diagnostico semplice e usato in tutto il mondo per la diagnosi di allergie è il *prick test*: si applica una goccia di allergene sulla cute dell'avambraccio pungendo leggermente con una lancetta monouso. Se il test è positivo, nel giro di pochi minuti nel punto in cui è stato applicato l'allergene compare un pomfo, un piccolo rigonfiamento pruriginoso simile a una puntura di zanzara.

Le intolleranze invece, pur a volte provocando sintomi simili a quelli delle allergie, quasi sempre a livello intestinale, non sono dovute a una reazione del sistema immunitario. Quelle scientificamente riconosciute sono pochissime e la più diffusa è quella al lattosio, lo zucchero presente nel latte. Le persone intolleranti al lattosio non producono più un enzima, la lattasi, in grado di scindere il lattosio in glucosio e galattosio.

Rapidi e ingannevoli

«Poiché molti pazienti ritengono che i loro disturbi siano legati all'assunzione di determinati alimenti, che spesso non riconoscono – continua il documento – i test *in vitro* di rapida esecuzione rappresentano un mercato in continua espansione e vengono offerti al pubblico sotto nomi diversi e accattivanti, sia nelle farmacie sia in laboratori privati o a volte anche convenzionati». Il prezzo di questi test oscilla tra 70 e 200 euro e il fatto di essere un esame «sul sangue» genera nell'utente la convinzione di aver effettuato un esame diagnostico di alta affidabilità e riproducibilità.

Il test che passa per gli anticorpi IgG4 è il più in voga al momento, tuttavia si è dimostrato non essere in grado di trovare allergie o intolleranze, indicando semplicemente una normale risposta del sistema immunitario all'esposizione di un certo alimento. Altri test di diagnosi di intolleranze alimentari senza prova scientifica di attendibilità elencati dal documento sono il test Vega, test di citotossicità, Alcat, elettroagopuntura di Voll, bioscreening, biostrength test, Sarm test, Mora test, test kinesiologico, Dria test, analisi del capello, iridologia, biorisonanza, pulse test e il riflesso cardiaco auricolare.

Se pensate di essere allergici o intolleranti a un alimento, è meglio se vi rivolgete a uno specialista.

Le intolleranze riconosciute scientificamente sono pochissime e la più diffusa è quella al lattosio, lo zucchero presente nel latte.

Ollo/iStockphoto

Rudy e Alice fanno da cavie per un esperimento stereofonico, in cui c'è anche la zampa della gatta Gaetanagnesi

Stereofonia con steroidi

"Non voglio saperlo.» La testa di Alice oscilla per rafforzare la negazione, nonostante il suo ingresso passi come al solito inosservato a tutti i conviventi umani, impegnati in una delle loro catastrofiche attività. Solo la gatta, verificato che nel groviglio di cavi, cavetti e materiale elettronico assortito non c'era alcunché di edibile, le si faceva incontro per darle il bentornato.

«Uh, Treccia!», dice finalmente Piotr, accompagnando il saluto con un veloce cenno del mento: «Capiti a proposito: stai per assistere a un esperimento di portata storica! Il Capo ha accettato di fare da cavia, e...»

È forse opportuno precisare subito che il «veloce cenno del mento» con cui Piotr gratifica Alice non è dovuto a indifferenza o condiscendenza, ma solo a ragioni squisitamente meccaniche: in mezzo al mastodontico groviglio di cavi ci si trova proprio lui, e non ha neppure un arto libero per un urbano cenno di saluto.

«Ho già detto che non voglio saperlo. Con Rudy che se ne sta dritto come un fuso al centro del pavimento della stanza, invece che tradizionalmente stravaccato in poltrona, e con te coperto da cavi e LED, le ipotesi possibili sono molte, ma non me ne piace neppure una. Ergo, lo ripeto per la terza volta: non voglio saperlo.»

«Beh – interviene Rudy – più che al "centro del pavimento della stanza", sono nell'esatto (orto-bari-in-circo) centro di questo bel triangolo equilatero che Doc ha disegnato sul *parquet*. L'hai notato? Ci sei dentro anche tu...»

Alice riprende a scuotere la testa in segno di frustrazione: neanche le rumorose fusa che le indirizza Gaetanagnesi riescono a farle cambiare espressione. «È perché siamo vicini a Natale, vero? Il pavimento sporcato di gesso come prova generale del presepe, Rudy che si esercita nel ruolo statico della stella cometa, e tu, Piotr, nella peggiore imitazione mai prodotta sul pianeta di un albero di Natale con le lucine addosso. Ditemi che è così, vi prego, e forse lo spirito natalizio mi impedirà di darvi fuoco seduta stante.»

«Su, Treccia, prova a rilassarti: Doc si è voluto lanciare in quest'esperimento superstereofonico e anche se ammetto di aver avuto inizialmente qualche timore, ho ricevuto da lui sufficienti garanzie: nonostante il profluvio di cavi elettrici, ha giurato solennemente che nessuno di questi avrà alta tensione e che in nessun caso verrà a contatto con la mia augusta persona. E persino lui, una volta finiti i numerosi collegamenti, smetterà di sembrare un abete natalizio. E poi dovresti saperlo: a parte l'onniscienza assoluta su ogni tipologia di dolce, l'elettronica è il campo in cui si difende meglio. Dagli un po' di fiducia, e persino la sala tornerà decente, dopo l'esperimento.»

«Ma vorreste almeno, di grazia, spiegarmi come si fa a definire "esperimento" un groviglio di fili con dentro Doc? Mi ricorda la scena di quando Gaetanagnesi, ancora micina, trovava un gomitolo di lana, ma con risultato estetico abissalmente inferiore. Tra l'altro, sbaglio o le componenti sparse per terra sono le interiora del nostro Hi-Fi?»

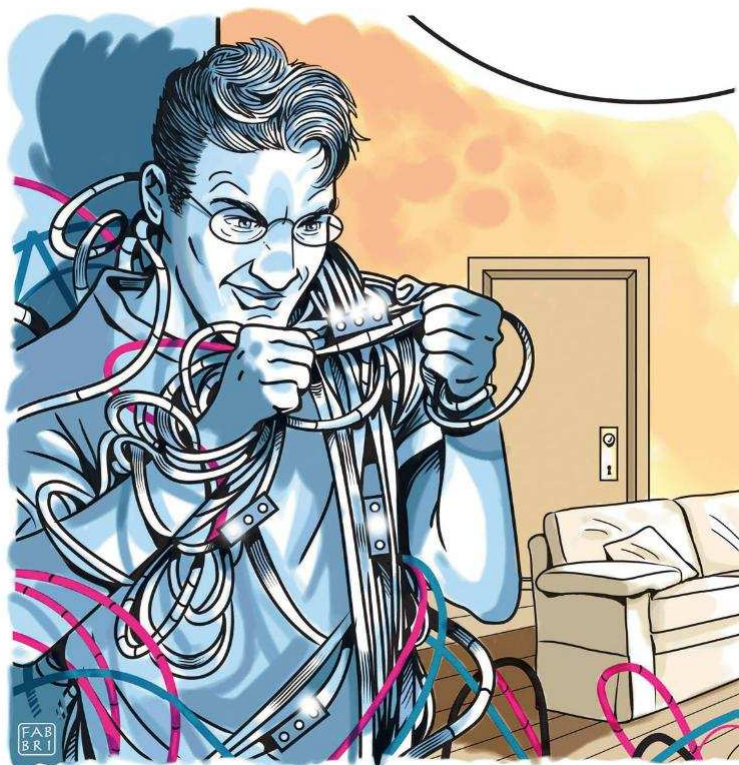



Illustrazione di Stefano Fabbri

«Già. Doc ha insistito per usare "sani metodi analogici". Il fatto che all'esperimento partecipi anche la sua adorata collezione di vinili, mi tranquillizza.»

«Sì, sì, Treccia, li ho smontati io... ma te lo ha già detto Rudy, poi rimonto tutto, fidati. È che mi serviva proprio aggiungere un terzo canale audio, oltre ai due nativi, e capirai che...»

«No, non provarci neppure. Non usare la parola "capirai", quando voi due complottate con certi intrallazzi. Sono una ragazza di sani principi con il serbatoio della tolleranza che è in riserva da una decina d'anni. Il nostro stereo ha sempre suonato benissimo, i nostri sistemi di altoparlanti ci sono sempre stati invidiati dagli amici, e da che mondo è mondo gli Hi-Fi casalinghi hanno avuto due belle uscite audio, solitamente chiamate "sinistra" e "destra". Cos'è adesso questa storia di un terzo elemento? Perché hai deciso di dopare il nostro amato impianto stereo?»

«È questo l'esperimento, Alice: Doc sostiene che la percezione del suono migliorerebbe assai se, anziché i due soliti altoparlanti,

di Rodolfo Clerico,
Piero Fabbri e
Francesca Ortenzio

La soluzione del problema esposto in queste pagine sarà pubblicata in forma breve a gennaio e in forma estesa sul nostro sito: www.lescienze.it. Potete mandare le vostre risposte all'indirizzo e-mail: rudi@lescienze.it.

IL PROBLEMA DI NOVEMBRE

Il problema del mese scorso riguardava l'individuazione di una data tra dieci possibili (29/3, 30/3, 31/3, 8/7, 11/7, 27/8, 30/8, 8/12, 27/12, 29/12), delle quali Doc conosce solo il giorno e Rudy solo il mese. Inizialmente Doc afferma di non conoscere la data e di essere certo che non la conosca neppure Rudy. A quel punto, Rudy afferma di conoscerla, seguito subito da Doc che sostiene, allora, di conoscerla anche lui.
È subito evidente che si possono escludere dalle papabili le date del 31 marzo e dell'11 luglio: essendo giorni «unici», Rudy, forte della conoscenza del mese, li avrebbe potuti subito individuare. Doc (che conosce il mese) non è in grado di decidere il giorno, mentre Rudy (che conosce il giorno) non è in grado di dedurre il mese. D'altro canto, questo esclude del tutto i mesi di marzo e luglio, perché se la data fosse caduta in uno di questi mesi Doc non avrebbe potuto essere sicuro che Rudy non conoscesse la data. Quindi, la festa è decisa per un qualche giorno di agosto o dicembre.
Questo permette di eliminare le due date che cadono nei giorni 27, perché Rudy, dopo l'affermazione di Doc, annuncia di conoscere la data, cosa che non avrebbe potuto affermare se fosse caduta il 27/8 o 27/12. Sopravvivono allora solo il 30 agosto e l'8 o 29 dicembre: conoscendo il giorno, Rudy a questo punto conosce la data completa, visto che i giorni sono tutti differenti. E visto che anche Doc afferma con sicurezza di conoscere la data completa, significa che non ha l'imbarazzo di dover scegliere fra le due date dicembrine, il che permette anche a noi di affermare che la festa è programmata per il prossimo 30 agosto. C'è tempo…

ne usassimo tre; ha fatto uno strano discorso di combinazioni non lineari dei segnali nel dominio delle frequenze che mi sono rifiutato di capire, ma insomma, secondo lui, se metti tre altoparlanti tutti alla stessa potenza ai vertici di un triangolo equilatero, e l'ascoltatore nel centro, l'esperienza musicale dovrebbe essere particolarmente quintessenziale ed esaltante.»

«Proprio così!», esclama Piotr: «Lui però sostiene che se madre natura ci ha fornito di due sole orecchie, bisognerebbe assecondarla e non sfidarla. Così, ecco perché è finito nel centro di quel triangolo.»

Alice sospira: «Non ne posso più… non potreste farmi almeno il favore di fare l'esperimento mettendo sul piatto del giradischi *4'33* di John Cage? Ha anche un titolo dal sapore matematico…»

«Spiritosa. No, dopo una lunga negoziazione, *The Number of the Beast* degli Iron Maiden è stata sconfitta in finale dal *Concerto brandeburghese n. 3* di J. S. Bach.»

«Bando alle ciance! La cavia è in posizione, e a questo punto tanto vale che resti anche tu nel triangolo, Treccia.»

Depositato con estrema cura il vinile sul piatto e appoggiata la puntina con la delicatezza di chi sta disinnescando una bomba all'idrogeno, le note di Bach pervadono l'aria. Ma, mentre Alice assume un'aria trasognata, Rudy ha un'aria perplessa.

«Doc, non vorrei dire, ma il violone si impone, e anche il clavicembalo non scherza… sei sicuro di aver regolato correttamente le uscite?»

«Secondo me erano perfette», mormora Alice.

«Aspettate un attimo… ah, ecco. La gatta, come al solito: ha pasticciato con i comandi del volume. Uno degli altoparlanti aveva una potenza quattro volte superiore a quella prevista. Adesso rimetto tutto a posto, e…»

«…aspetta, Doc. Esisteranno pure gatti in grado di "pasticciare", ma l'ultima cosa che Gaetanagnesi ha pasticciato è stato il gomitolo citato da Alice, quando aveva tre settimane. Non hai notato che Alice sentiva benissimo?»

«E che cosa c'entra? Non era neppure al centro del triangolo, dove stavi tu!»

«Appunto. Gli altoparlanti sono di qualità, omnidirezionali, i muri anecoici; la potenza del suono continua a calare con il quadrato della distanza da che mondo è mondo e, secondo te, è del tutto "casuale" che la nera belva felina abbia spostato la manopola di un altoparlante in modo tale che il suo umano preferito senta perfettamente la musica?»

«Beh, ma allora… vuoi insinuare che Gaetanagnesi abbia capito al volo come regolare la potenza delle uscite audio solo per fare un piacere a Treccia?»

«Oh, l'hai detto tu che un solo comando è stato modificato dalla gatta, no? Se preferisci, rigiriamo il problema: ti sembra impossibile calcolare dove dovrebbe mettersi una persona all'interno dell'equilatero "triangolo acustico" per sentire tutti e tre gli altoparlanti alla stessa potenza, se uno emette una potenza quadrupla rispetto agli altri? E soprattutto, ti pare impossibile che una come Gaetanagnesi possa aver inquadrato e risolto il problema nel tempo di una distratta svirgolata di coda?»

«Va bene, va bene, mi hai convinto. Lo ha fatto apposta. Adesso però rimetto a posto i potenziometri, tu rimani nel centro esatto del triangolo, e se quella micia prova a riavvicinarsi alla console giuro che stavolta vesto lei da albero di Natale.»

Uno sguardo nuovo sulla vicenda umana

Come lo studio del DNA antico sta cambiando la genetica delle popolazioni

Chi siamo e come siamo arrivati fin qui
di David Reich
Raffaello Cortina, Milano, 2019, pp. 405 (euro 29,00)

«Ragazzi – si sentì sussurrare nell'orecchio David Reich alcuni anni fa – quand'è che capirete perché voi ebrei siete più svegli degli altri?.» La voce era quella di Jim Watson, scopritore insieme a Francis Crick della struttura a doppia elica del DNA, e più di recente autore di dichiarazioni dal sapore decisamente razzista sulle presunte basi genetiche dell'intelligenza delle popolazioni africane, duramente criticate dalla comunità scientifica. In questo libro Reich, genetista alla Harvard Medical School, fa un resoconto accessibile e coinvolgente delle conoscenze più recenti sulla storia di *Homo sapiens* e del popolamento del pianeta, ma affronta anche a viso aperto le delicate e scivolose questioni che lo studio della genetica delle popolazioni umane sta sollevando.

Il libro si apre con l'omaggio di Reich al suo maestro Luigi Luca Cavalli-Sforza, che 25 anni fa ci consegnò con *Storia e geografia dei geni umani* (Adelphi) il primo affresco complessivo delle grandi migrazioni del passato basandosi sulle differenze genetiche tra le popolazioni umane odierne. Un affresco che oggi scienziati come Reich stanno rivedendo in profondità alla luce della rivoluzione del DNA antico, la possibilità di estrarre e sequenziare il genoma da fossili di nostri antenati vissuti decine di migliaia di anni fa, e delle analisi dell'intero genoma, che stanno integrando quelle del cromosoma Y e del DNA mitocondriale su cui i genetisti di popolazione avevano basato finora le loro conclusioni. Una delle parole che ricorrono di più nel libro è «sorpresa». Reich paragona l'analisi del DNA antico all'introduzione del microscopio che spalancò le porte alla visione di mondi inaspettati. Racconta per esempio la sua iniziale resistenza a credere che si fosse verificata un'ibridazione tra *sapiens* e Neanderthal, ma che ha dovuto lasciare il passo alle prove dei dati «arcignamente coerenti» dopo il sequenziamento del genoma dei nostri cugini estinti.

Uno degli aspetti più interessanti del libro sono i riflessi sociali e politici delle ricerche di genetica delle popolazioni. Nel 2008 Reich visse le 24 ore più tese della sua carriera quando si trovò a presentare a Hyderabad risultati che dimostravano che gli indiani odierni sono il risultato di una miscela di due popolazioni ancestrali altamente divergenti, una delle quali denominata «eurasiatici occidentali». Uno scenario che non collimava con le conclusioni dei colleghi indiani, che contestavano l'idea che una migrazione esterna avesse trasformato la popolazione indiana.

Il capitolo destinato a far maggiormente discutere è quello dedicato all'idea di «razza». Reich esprime una critica netta a scienziati o giornalisti che negli ultimi anni hanno suggerito che l'analisi del genoma umano possa permettere di dividere l'umanità in razze biologiche. Ma, per impedire pericolose derive razziste nell'uso della genetica, si è creata secondo Reich un'ortodossia nella comunità scientifica che ritiene sostanzialmente trascurabili le differenze genetiche tra popolazioni. Differenze che invece non dovremmo avere timore di studiare, sviluppando una nuova mentalità e usando un linguaggio diverso, libero dai retaggi di politiche discriminatorie. Più studiamo i genomi del passato, più emerge che non sono mai esistite «razze pure», ma che le diverse popolazioni si sono continuamente ibridate. Analizzare le differenze ci permette di raccogliere informazioni utili per studiare per esempio la predisposizione alle malattie. Trascurarle rischia secondo Reich di lasciare spazio all'avanzata della pseudoscienza.

Un libro ricco di storie, che solleva domande importanti sul passato e sul futuro, e fa capire come ognuno di noi nel proprio genoma, per dirla alla Walt Whitman, contiene moltitudini.

Marco Motta

Quanto è super quel supercibo?

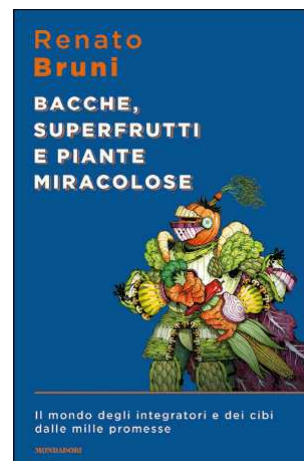
Cosa sappiamo – e perché – sugli effetti dei rimedi naturali

Nell'Ottocento fu l'estratto di pomodoro. Oggi sono il mirtillo, l'açaí o le bacche di goji: rimedi miracolosi che il mondo vegetale ci offre, al naturale, come ingredienti di preparati vari, o nei tantissimi integratori alimentari. Ma funzionano?

Bruni ci fa il grande favore di non dircelo. O almeno, di non liquidarci con la risposta che usava dare a chi gli chiedeva consiglio sul prodotto del momento: «Non serve a niente. Soldi buttati». Né con l'osservazione più conciliante che sì, fanno bene, tanto quanto un'arancia o una mela che costano decine di volte meno. Bruni rifiuta quindi la polarizzazione di «un funziona/non funziona gradito a chi cerca soluzioni pronte, ma imperfetto per capire e scegliere davvero». E accetta la sfida desueta di navigare «nella zona di mezzo, quella in cui stanno le vere spiegazioni, quelle basate sul dubbio, sull'incertezza e sulla probabilità tipica delle faccende naturali».

Così, come nella massima dell'insegnare a pescare anziché regalare un pesce, non ci dà solo tante informazioni sui singoli rimedi (perché sì, in realtà poi le dà), ma decifra che cosa si cela dietro a quelle promesse, all'andirivieni di mode e al nostro darvi credito. Aiuta a interpretare in modo critico le etichette: se «lo zinco contribuisce alla normale funzione del sistema immunitario», quell'integratore mi aiuterà per la cistite? Precisa che cosa possiamo sapere sugli effetti di certi composti, che cosa ci dicono certi studi e che cosa non possono dirci. E in tutto ciò rimette in campo i numeri, i grandi assenti da tanti proclami; senza i quali, senza dare cioè una misura all'intensità degli effetti di cui si discute, ha ben poco senso discuterne.

«I superfrutti fanno bene in quanto frutti e tutti i frutti sono super», quindi. Perché la vera raccomandazione che si può dare, confermata dagli studi più svariati, è di una disarmante semplicità: mangiare più di cinque porzioni al giorno di frutta e verdura riduce del 20-30 per cento la probabilità di tumori e malattie cardiovascolari. E questa è «la cosa probabilmente più solida che in questo momento sappiamo sulla nostra salute alimentare».

Giovanni Sabato

Bacche, superfrutti e piante miracolose
di Renato Bruni
Mondadori, Milano, 2019,
pp. 204 (euro 18,00)

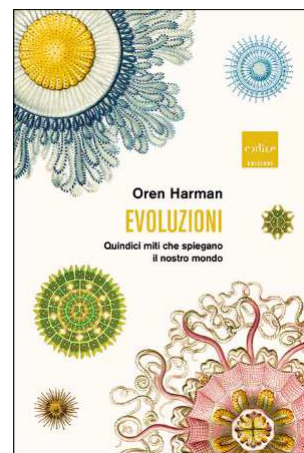
Storie dell'universo, e non solo

Raccontare la scienza usando il linguaggio della finzione

In questa rubrica di segnalazioni solo occasionalmente hanno trovato spazio libri che appartengono al mondo della finzione. A farla da padrone sono solitamente saggi scientifici, *memoir* che raccontano dall'interno il percorso che ha portato a una grande scoperta, dissertazioni storiche che ci aiutano a mettere in prospettiva momenti della scienza del passato. Fin dalle premesse, però, Oren Harman dichiara che il suo libro non appartiene a questi generi e, anzi, farà ampio ricorso all'immaginazione. Non perché proponga qualcosa che non è, ma perché racconta alcune storie sull'universo esponendole con il linguaggio del mito, quindi per l'appunto, attraverso una finzione.

È lo stesso autore, storico della scienza di professione, a spiegarci il senso dell'esperimento. Il pensiero illuminista ha nettamente separato la descrizione del mondo basata sull'osservazione scientifica da quella del mito e della poesia. Se questi due strumenti conoscitivi paiono in diretta contraddizione, Harman ci ricorda che scienziati e anonimi autori dei miti muovono dalla stessa «fame di conoscenza»: un forte desiderio di cercare risposte alle domande sul mondo. Una fame che prima dell'emergere del metodo scientifico poteva appagarsi solamente con i miti.

Il libro è un tentativo di chiudere la distanza che oggi li separa, attraverso uno sforzo immaginativo in 15 racconti, dal big bang alla conquista delle terre emerse da parte delle prime forme di vita, dall'apparizione del sesso alla nascita del linguaggio. La lingua e lo stile sono quelli del mito e della narrazione, nel filone usato da Calvino nelle *Cosmicomiche* o da Primo Levi in alcuni suoi racconti. La sostanza narrata è invece una quintessenza di quanto sappiamo oggi su quegli argomenti. La sfida di Harman portare nozioni scientifiche anche a chi non ne legge abitualmente attraverso il cavallo di Troia del mito e del racconto. Una sfida vinta già dalla prima edizione inglese, perché la qualità della finzione letteraria è di tale livello che il lettore viene presto affascinato e fatica a staccarsi dalla pagina.

Marco Boscolo

Evoluzioni
di Oren Harman
Codice Edizioni, Torino, 2019,
pp. 212 (euro 18,00)

L'evoluzione della non violenza

Un processo di autoaddomesticamento ci ha reso docili

Questo libro parte da una domanda: come mai la nostra vita quotidiana, all'interno del nostro gruppo, è così tranquilla, poco aggressiva, mentre siamo in grado di scatenare guerre estremamente aggressive verso gli «altri»? È appunto il fenomeno che dà il titolo al volume, il «paradosso della bontà». Da questo punto di vista, noi *sapiens* siamo diversi dai primati a noi più vicini (gli scimpanzé) e da molti altri animali selvatici.
Questa caratteristica umana è stata notata da molto tempo, e in diversi – tra i quali Johann Friedrich Blumenbach e Charles Darwin – hanno intuito la risposta corretta: siamo una specie addomesticata, e le differenze tra noi e gli scimpanzé sono le stesse che passano tra cane e lupo. Wrangham mette in fila, con un notevole gusto per il dettaglio e la capacità di irretire il lettore, un gran numero di indizi in questo senso, dalla paleontologia alle neuroscienze. Fisicamente, esibiamo le caratteristiche tipiche della domesticazione: sembriamo più «bambini» rispetto alla specie selvatica (la cosiddetta pedomorfosi), e c'è meno differenza tra i due sessi.
Le stesse caratteristiche (insieme ad altre) sono emerse nel lunghissimo, celebre e ininterrotto studio iniziato nel 1958 in URSS da Dmitrij Beljaev sulla domesticazione delle volpi argentee. Noi però ci siamo autoaddomesticati: per vivere insieme abbiamo scientemente selezionato tratti di minore aggressività. Di fatto, secondo Wrangham, ci siamo addomesticati perché i nostri antenati iniziarono a eliminare chi usava la violenza a proprio vantaggio e non si conformava alle regole del gruppo: la pena di morte, decisa in collaborazione, avrebbe portato a selezionare tratti di conformismo e minore aggressività, e quindi alla capacità di stare insieme, comunicare e basare le nostre relazioni su comportamenti non violenti e potenzialmente più creativi.
La soluzione del paradosso della bontà sarebbe quindi un'ipotesi affascinante e ancora più paradossale: siamo così docili e cooperativi grazie alla passata capacità di essere assassini organizzati. Oggi, resta il problema di limitare questa macchina sociale per la violenza.

Mauro Capocci

Il paradosso della bontà
di Richard Wrangham
Bollati Boringhieri, Torino, 2019,
pp. 464 (euro 28,00)

A volte ritornano?

Viaggio tra i tentativi di riportare in vita «il mondo perduto»

Nel film *Jurassic Park*, John Hammond è un miliardario che, con un parco dei dinosauri, intende offrire ai visitatori l'emozione di vedere con i propri occhi i giganti del passato spazzati via da un'estinzione di massa. Difficile non immedesimarsi almeno un po' nell'eccentrico Hammond, o nel paleontologo che osserva per la prima volta dal vivo le creature a lungo studiate nei fossili.
Tra le scoperte che il libro del giornalista scientifico Massimo Sandal regala al lettore, c'è il fatto che il sogno di *Jurassic Park* è destinato a restare tale: il DNA non può resistere così a lungo e la fragilità di questa molecola fissa un limite che appare invalicabile alla possibilità di far rinascere una specie. Eppure la de-estinzione è oggi teoricamente possibile grazie a tecniche come la clonazione, attraverso cui si è potuto, per esempio, riportare in vita, per così dire, per sette drammatici minuti di sofferenza, il bucardo, o capra dei Pirenei, anche se qualcosa andò storto perché il clone aveva i polmoni malformati.
Passando attraverso questo primo tentativo, l'autore traccia la storia dei progetti per far rivivere alcune tra le specie scomparse dal pianeta, illustrando le implicazioni scientifiche, etiche, ecologiche, tecniche, pratiche di un sogno che è molto più complesso di quello che appare. E anche costellato di ingiustizie: dell'estinzione delle cosiddette «specie carismatiche» (tra tutte, il mammut che dà il titolo al saggio) ci dispiace molto di più, per esempio, di quella degli invertebrati. Così come nessuno sembra provare empatia verso i patogeni: ci mettono in pericolo, quindi togliamo loro persino la dignità di esseri viventi.
Ma prima di essere un libro sulla resurrezione, questo è un libro sull'estinzione, «la punteggiatura che dà il ritmo alla nostra descrizione geologica della storia della Terra», «le ceneri su cui abbiamo germogliato», su cui è importante interrogarsi, per riflettere, per esempio, sul nostro ruolo nella grande estinzione in corso. Tra i pregi, oltre all'accuratezza scientifica, fa piacere segnalare lo stile curatissimo, la ricerca della frase sintetica a effetto, dell'aforisma, della citazione efficace e non banale.

Anna Rita Longo

La malinconia del mammut
di Massimo Sandal
il Saggiatore, Milano, 2019,
pp. 334 (euro 22,00)

U.MANO
dal 20 novembre 2019 al 9 aprile 2020
Centro Arti e Scienze Golinelli, via Paolo Nanni Costa, 14, Bologna
www.fondazionegolinelli.it

Toccare, fare, conoscere il mondo

In una mostra a Bologna la mano è l'elemento di raccordo tra l'arte e la scienza

La mani chiuse a indicare l'interiorità, quelle aperte a simboleggiare l'esplorazione del mondo. È con queste due suggestioni tradotte in installazioni che si apre il percorso espositivo della nuova mostra dell'Opificio Golinelli: mani come simboli plurimi della relazione di conoscenza tra l'essere umano e il mondo. Un po' a ribadire, in modo indiretto, una celebre massima del critico d'arte Ernst Fischer che, nel suo *L'arte è necessaria?* del 1959, scriveva che «la mano è il vero organo della civiltà, iniziatore dell'evoluzione umana». Ovvero: il pollice opponibile che ha dato vantaggi evolutivi determinanti a *Homo*, qui inteso anche nel senso latino di *faber*, e l'arto che permette il procedimento creativo in molti campi.

Il rapporto tra arte e scienza è da sempre al centro degli interessi di Marino Golinelli, il fondatore dell'Opificio che porta il suo nome, e secondo i curatori della mostra la mano può proprio essere perfetto *trait d'union* declinato in una varietà infinita di possibilità conoscitive ed estetiche. Tra le opere esposte che dimostrano l'assunto c'è davvero l'imbarazzo della scelta: alcune cere anatomiche settecentesche di Anna Morandi Manzolini, esempio di manufatto artistico che si basa su e porta a nuova conoscenza anatomica; il *De Symmetria partium in rectis formis humanorum corporum libri* di Albrecht Dürer, usato come base di istruzioni per un algoritmo di arte generativa; la «scultura aumentata» mano-cervello realizzata dalla fondazione stessa che esplicita lo stretto rapporto tra l'organo e l'arto. Esempi che dimostrano il mix di installazioni, rielaborazioni matematiche e scientifiche, opere d'arte in senso stretto che costituiscono il percorso di suggestioni non lineari.

Inoltre, la continua serie di rimandi all'accelerazione della conoscenza avvenuta in Europa tra il Rinascimento e la prima Età Moderna, quando è emerso anche il metodo scientifico, suggerisce un'interpretazione del presente come periodo altrettanto fertile.

Succede, per esempio, con l'arto bionico prodotto da BionIt Labs che dialoga idealmente con le mani della *Creazione di Adamo* di Michelangelo, un dipinto qui reinterpretato da Michelangelo Pistoletto in un «quadro specchiante». Un *humus* dal quale, secondo il Presidente della Fondazione Andrea Zanotti, anche oggi c'è spazio perché scienziati e artisti possano scrutare «orizzonti a noi preclusi».

Matteo Boscolo

Alcuni delle opere esposte all'Opificio Golinelli: sopra, una cera anatomica del XVIII secolo; a destra, *Madonna col bambino*, di Caravaggio (attr.); sotto, un disegno di Dürer.

Prossimo numero

a gennaio

Mostri dei cieli mesozoici

di Michael Habib

Nuovi fossili e modelli matematici stanno rispondendo ad annosi interrogativi su come vissero – e perché si sono estinti – gli pterosauri, i primi animali vertebrati ad acquisire il volo, quasi 80 milioni di anni prima degli uccelli.

Dieci nuove tecnologie da tenere d'occhio

di J. Garcia Martinez, C. E. Lathan, G. Ling, A. Moscatelli, E. O'Day, J. Carbeck, A. Maynard, R. Chandrawati, B. S. Meyerson, M. Fischetti, S. Yup Lee, A. Thompson

Dalle bioplastiche ai robot sociali, dai fertilizzanti smart ai reattori nucleari sicuri agli accumulatori di energia per fonti rinnovabili, dieci sviluppi tecnologici che potrebbero cambiare il futuro.

Cristalli nel tempo

di Frank Wilczek

Nuovi sorprendenti stati della materia chiamati cristalli temporali mostrano nel tempo le stesse proprietà di simmetria che i normali cristalli presentano nello spazio. Queste nuove forme potrebbero portarci verso orologi più precisi e altre applicazioni utili.

Mark Ross Studio (*cristalli*); Chase Stone (*pterosauri*)

LE SCIENZE S.p.A.

Sede legale: Via Cristoforo Colombo 90, 00147 ROMA.

Redazione: tel. 06 49823181
Via Cristoforo Colombo 90, 00147 Roma
e-mail: redazione@lescienze.it
www.lescienze.it

Direttore responsabile
Marco Cattaneo

Redazione
Claudia Di Giorgio (*caporedattore*), Giovanna Salvini (*caposervizio grafico*), Andrea Mattone (*grafico*), Cinzia Sgheri, Giovanni Spataro

Collaborazione redazionale
Folco Claudi, Gianbruno Guerrerio
Segreteria di redazione:
Andrea Lignani Marchesani
Progetto grafico: Giovanna Salvini

Referente per la pubblicità
A. Manzoni & C. S.p.A.
agente Daria Orsi (tel. 02 57494475, 345 4415852)
e-mail dorsi@manzoni.it

Pubblicità:
A. Manzoni & C. S.p.A.
Via Nervesa 21, 20139, Milano,
telefono: (02) 574941

Stampa
Puntoweb, Via Variante di Cancelliera, snc, 00040 Ariccia (RM).

Consiglio di amministrazione
Corrado Corradi (presidente), Michael Keith Florek (vice presidente), Gabriele Acquistapace, Markus Bossle, Stefano Mignanego

Responsabile del trattamento dati
Il responsabile del trattamento dei dati raccolti in banche dati di uso redazionale è il direttore responsabile a cui è possibile rivolgersi scrivendo a privacy@lescienze.it per i diritti previsti dal Regolamento (UE) 2016/679 sulla protezione dei dati personali.

Registrazione del Tribunale di Milano n. 48/70 del 5 febbraio 1970.

Rivista mensile, pubblicata da Le Scienze S.p.A.
Printed in Italy - dicembre 2019

ISSN 2499-0590

SCIENTIFIC AMERICAN

Acting Director in Chief
Curtis Brainard
President
Dean Sanderson
Executive Vice President
Michael Florek

Hanno collaborato a questo numero
Per le traduzioni: Silvia Baldi: *La ricetta di Darwin contro il cancro;* Federica Cuneo: *Fine di un ciclo*; Daniele Gewurz: *Un superconduttore da sogno, Il problema dei tre corpi;* Lorenzo Lilli: *Lotte tra animali*; Alfredo Tutino: *È reversibile la morte?*

ABBONAMENTI E ARRETRATI
GEDI Distribuzione S.p.A.

Per informazioni sulla sottoscrizione di abbonamenti e sulla richiesta di arretrati telefonare al numero 0864.256266 o scrivere a abbonamenti@gedidistribuzione.it o arretrati@gedidistribuzione.it
Fax 02.26681986.

Italia	
abb. annuale	€ 39,00
abb. biennale	€ 75,00
abb. triennale	€ 99,00
copia arretrata	€ 9,00
Estero	
abb. annuale Europa	€ 52,00
abb annuale Resto del Mondo	€ 79,00

Accertamento diffusione stampa certificato n. 8593 del 18/12/2018